

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

PROTÓTIPO DE UM SISTEMA ESPECIALISTA PARA AUXÍLIO À  
OPERAÇÃO DE SUBESTAÇÕES DE ALTA TENSÃO

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA

PAULO NEVES DE LACERDA

FLORIANÓPOLIS, JUNHO 1987

PROTÓTIPO DE UM SISTEMA ESPECIALISTA PARA APOIO  
À OPERAÇÃO DE SUBESTAÇÕES DE ALTA TENSÃO

PAULO NEVES DE LACERDA

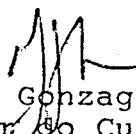
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO  
DE

MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA ELÉTRICA E APROVADA EM SUA FORMA FINAL  
PELO PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO

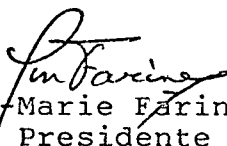


Prof. Jean-Marie Farines  
Orientador



Prof. Luiz Gonzaga de Souza Fonseca  
Coordenador do Curso de Pós-graduação  
em Engenharia Elétrica

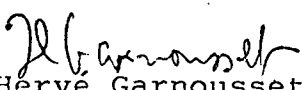
BANCA EXAMINADORA



Prof. Jean-Marie Farines, Dr.Ing.  
Presidente



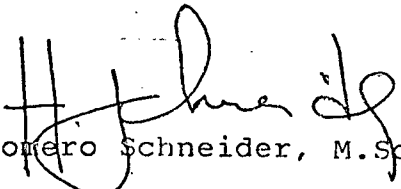
Prof. Luiz João Branco Machado, Dr.Ing.



Prof. Hervé Garnousset, Dr.Ing.



Eng. Fernando Roderico Hollanda de Azevedo



Eng. Homero Schneider, M.Sc.

À CARMEN, ANAPULA e  
MARIÑA

## AGRADECIMENTOS

- A CELESC, que permitiu que este trabalho fosse realizado.
- A Roberto Lacerda, meu pai, e Sérgio Lacerda, meu tio , cujo empenho tornou possível a realização deste trabalho.
- Aos amigos José C. Ramos, Sérgio S. Stupp, e Cláudio Ramachado pelo incentivo.
- Aos colegas do ICMi pelo apoio.
- A Jean-Marie Farines pela orientação, dedicação e paciência.
- A Leandro J. Komesinski pela inestimável ajuda.

## ÍNDICE

RESUMO.....	x
ABSTRACT.....	xi
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO 2 - SISTEMA DIGITAL DE CONTROLE DISTRIBUÍDO EM SUBESTAÇÕES DE ALTA TENSÃO.....	4
2.1. Introdução.....	4
2.2. Funções do Sistema de Controle.....	4
2.3. Os Sistemas de Controle em Subestações de Alta Tensão..	7
2.3.1. O Sistema Convencional de Controle.....	8
2.3.2. O Sistema Digital de Controle Centralizado.....	8
2.3.3. O Sistema Digital de Controle Distribuído.....	11
2.4. Sistemas Digitais de Controle Distribuídos em Su- bestações.....	13
2.4.1. Considerações a respeito do SDCD em Subesta- ções.....	14
2.4.2. Organização Funcional dos SDCD.....	17
2.4.3. Requisitos de Comunicação.....	21
2.4.4. Aspectos da Arquitetura dos SDCD em Subesta- ções.....	22
2.4.5. Interface Homem-Máquina.....	27
2.4.6. Dois Exemplos de SDCD.....	27
2.5. Situação do Presente Trabalho.....	35
2.5.1. Tarefas Vinculadas a uma Contingência.....	35
2.5.2. Tarefas não vinculadas a uma contingência.....	36
2.5.3. Funções do Operador.....	36
2.6. Conclusões.....	38

CAPÍTULO 3 - INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL.....	39
3.1. Introdução.....	39
3.2. Uma Visão Histórica da Inteligência Artificial.....	39
3.3. Definição.....	41
3.4. Estrutura da Inteligência Artificial.....	41
3.4.1. Núcleo Básico da IA.....	43
3.4.2. Ferramentas de IA.....	43
3.4.3. Aplicações de IA.....	44
3.5. O Processo de Procura.....	45
3.5.1. Estruturação do Espaço de Estados.....	45
3.5.2. Direção da Procura.....	46
3.5.3. Procura Heurística.....	47
3.5.4. Estratégias de Procura.....	48
3.6. Representação do Conhecimento.....	52
3.6.1. Estruturação do Conhecimento.....	53
3.6.2. Formalização do Conhecimento com Regras de Produção.....	56
3.7. Raciocínio e Solução de Problemas.....	58
3.7.1. O Princípio da Resolução.....	58
3.7.2. Fator de Confiança.....	63
3.8. Ferramentas de IA.....	63
3.8.1. Linguagens Procedurais ou Imperativas.....	64
3.8.2. Linguagens Declarativas.....	64
3.9. Aplicações de IA : Sistemas Especialistas.....	67
3.9.1. Algumas Definições.....	67
3.9.2. Sistemas de Produção.....	68
3.9.3. Categorias de Aplicação.....	69
3.9.4. Quando Usar um Sistema Especialista.....	70

3.9.5. Estrutura de um Sistema Especialista.....	72
3.9.6. Construção de um Sistema Especialista.....	72
3.9.7. Escolha da Ferramenta para Construção de um Sistema Especialista.....	75
3.9.8. Diferenças entre Sistemas Especialistas e Sistemas Convencionais.....	76
3.9.9. Limitações de um Sistema Especialista.....	77
3.10 Conclusões.....	77
CAPÍTULO 4 - CARACTERÍSTICAS GERAIS DE UM SISTEMA ESPE-	
CIALISTA PARA AUXÍLIO À OPERAÇÃO DE SUBES-	
TAÇÕES DE ALTA TENSÃO.....	
4.1. Introdução.....	78
4.2. Considerações Sobre a Complexidade das Funções do Operador.....	78
4.3. Funções do Operador.....	79
4.3.1. Atendimento de Contingências.....	79
4.3.2. Tratamento de Alarmes.....	80
4.3.3. Diagnóstico de Defeitos.....	82
4.4. Justificativas da Utilização de um Sistema Espe-	
cialista.....	82
4.5. Características de um Sistema Especialistas para Auxílio a Operação de Subestações.....	84
4.5.1. Sua Instalação.....	84
4.5.2. Suas Funções.....	85
4.5.3. Seu Funcionamento Interno.....	86
4.6. Estrutura de um Sistema Especialista para Auxílio à Operação de Subestações.....	86

4.7. Proposta de Trabalho.....	89
4.8. Conclusões.....	92

## CAPÍTULO 5 - PROTÓTIPO DO SISTEMA ESPECIALISTA PARA

AUXÍLIO À OPERAÇÃO DE SUBESTAÇÕES.....	94
5.1. Introdução.....	94
5.2. Base de Conhecimentos.....	94
5.2.1. Representação do Conhecimento.....	94
5.2.2. Estrutura da Base.....	96
5.2.3. Fator de Confiança de uma Regra .....	99
5.2.4. Fator de Certeza de uma Solução.....	99
5.2.5. Fator de Utilização.....	101
5.3. Interfaces.....	101
5.3.1. Interface de Inicialização.....	101
5.3.2. Interface com Operador.....	102
5.3.3. Interface com Especialista.....	105
5.3.4. Análise dos Dados.....	108
5.4. Base de Trabalho.....	109
5.5. Motor de Inferência.....	109
5.5.1. A Técnica de Procura.....	109
5.5.2. Estratégias de Procura.....	110
5.6. Características do Protótipo.....	113
5.7. Exemplos de Utilização do Sistema Especialista MINOS..	114
5.7.1. Exemplo de Utilização para Tratamento de Alarmes.....	114
5.7.2. Exemplo de Utilização para Diagnóstico de Defeitos.....	119



5.8. Conclusões..... 123

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES..... 126

BIBLIOGRAFIA..... 130

## RESUMO

A crescente utilização da informática em Subestações de Alta Tensão, tem permitido o desenvolvimento de Sistemas de Controle mais confiáveis e eficientes.

Dentro desta filosofia, este trabalho apresenta a implementação de um Sistema Especialista que auxilie os Operadores de Subestações a executarem funções como Tratamento de Alarmes e Diagnóstico de Defeitos.

Além das especificações e detalhamento do protótipo de um Sistema Especialista para Auxílio a Operação de Subestações, são apresentados neste trabalho, estudos sobre Sistemas de Controle de Subestações e fundamentos de Inteligência Artificial, os quais permitiram a realização desta proposta.

## ABSTRACT

The growing use of computer-based systems in High Voltage Substations has allowed the development of more reliable and efficient Control Systems.

This thesis work proposes an Expert System-based approach, in order to help human operators in fault diagnosis and alarms handling operations.

Some general concepts on Substations Control Systems and Artificial Intelligence methods are presented which allow specifying an Expert aid for substations operations.

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO:

A introdução das tecnologias ligadas à informática, nas áreas de geração e transmissão da energia elétrica, vem trazendo de forma semelhante ao que está acontecendo em outras áreas, grandes benefícios em termos de custo, confiabilidade e desempenho.

Estas tecnologias aplicadas às Subestações de Alta Tensão tem permitido a automatização de um número crescente de funções, tais como, monitoração, supervisão, proteção e controle. Por esta razão, vem ocorrendo, nestes últimos anos, uma evolução de caráter irreversível na área de subestações, cuja influência se faz sentir tanto na operação como no projeto destas.

De uma concepção de subestações com todas as operações centralizadas numa sala de controle, onde todos os dispositivos de monitoração, supervisão, proteção e controle são instalados em painéis, evoluiu-se em poucos anos para uma concepção onde grande parte das funções são assumidas por computadores distribuídos, no pátio e na sala de controle.

Esta nova concepção traz resultados tangíveis no que concerne a:

- a redução do custo global do projeto das subestações, que se deve principalmente a substituição dos painéis nas salas de controle por microcomputadores, e a utilização de

- suporte de comunicação mais econômico; esta redução tem origem na concepção distribuída do controle das subestações e na natureza dos sinais a serem transmitidos;
- a introdução de funções auxiliares importantes, até então de difícil realização, tais como tarifação, osciloperturbografia, registro cronológico de eventos, e a integração das principais funções do Sistema de Controle;
  - a melhoria do desempenho e da segurança da subestação e, em consequência, de todo o sistema de transmissão e distribuição de energia elétrica.

Entretanto, algumas tarefas de natureza decisória, tais como, o diagnóstico a partir de alarmes ou defeitos e o atendimento de contingências com as suas conseqüentes tomadas de decisões, se encontram ainda na maior parte dos casos a cargo do operador ou de uma equipe técnica. A introdução de sistemas baseados na representação do conhecimento e nas técnicas de Inteligência Artificial permite atingir soluções que aumentam o desempenho e o grau de confiabilidade na execução deste tipo de tarefas.

Este trabalho visa apresentar uma proposta de um Sistema Especialista que tem condições de auxiliar o operador de subestações de alta tensão a desempenhar suas tarefas.

Após a descrição da evolução dos Sistemas de Controle em subestações e a apresentação das características gerais dos Sistemas Digitais de Controle Distribuído para este tipo de aplicação (Capítulo 2), e após a apresentação dos princípios

fundamentais da Inteligência Artificial, com destaque para as características dos Sistemas Especialista (Capítulo 3), são descritos nos capítulos seguintes deste trabalho, a especificação geral do Sistema Especialista proposto, apresentando as várias etapas de desenvolvimento deste (Capítulo 4) e o protótipo do Sistema Especialista para Auxílio a Operador de Subestações implementado neste trabalho (Capítulo 5); são destacadas em particular as formas de representar o conhecimento e as técnicas de procura de soluções escolhidas para tratar os problemas de alarmes, defeitos e contingências; são também apresentados alguns testes sobre o protótipo implementado, e analisado o seu desempenho, concluindo a respeito das suas vantagens, das suas limitações e propondo melhorias deste para trabalhos futuros.

## CAPÍTULO 2

### SISTEMA DIGITAL DE CONTROLE DISTRIBUÍDO EM SUBESTAÇÕES DE ALTA TENSÃO

#### 2.1. INTRODUÇÃO:

Uma subestação representa nós de um Sistema Elétrico com as seguintes funções:

- Alterar a topologia do Sistema Elétrico através da abertura ou fechamento de interligações (internas e/ou externas) com outras subestações;
- Transformar as tensões para níveis adequados a transmissão ou distribuição da Energia Elétrica;
- Monitorar as grandezas elétricas que lhe são pertinentes;
- Proteger as instalações e linhas quando na ocorrência de condições anormais das grandezas elétricas, através do isolamento em alta velocidade das partes defeituosas.

Para atingir tais objetivos, que caracterizam um serviço de boa qualidade, é necessário a existência de um Sistema de Controle na subestação. Este Sistema de Controle se decompõe num conjunto de funções que podem ser realizadas de forma automática ou não. A fig. 2.1 mostra as funções de um Sistema de Controle e a interação deste com a subestação.

#### 2.2. FUNÇÕES DO SISTEMA DE CONTROLE:

As principais funções que o Sistema de Controle deve ser capaz de desempenhar são:

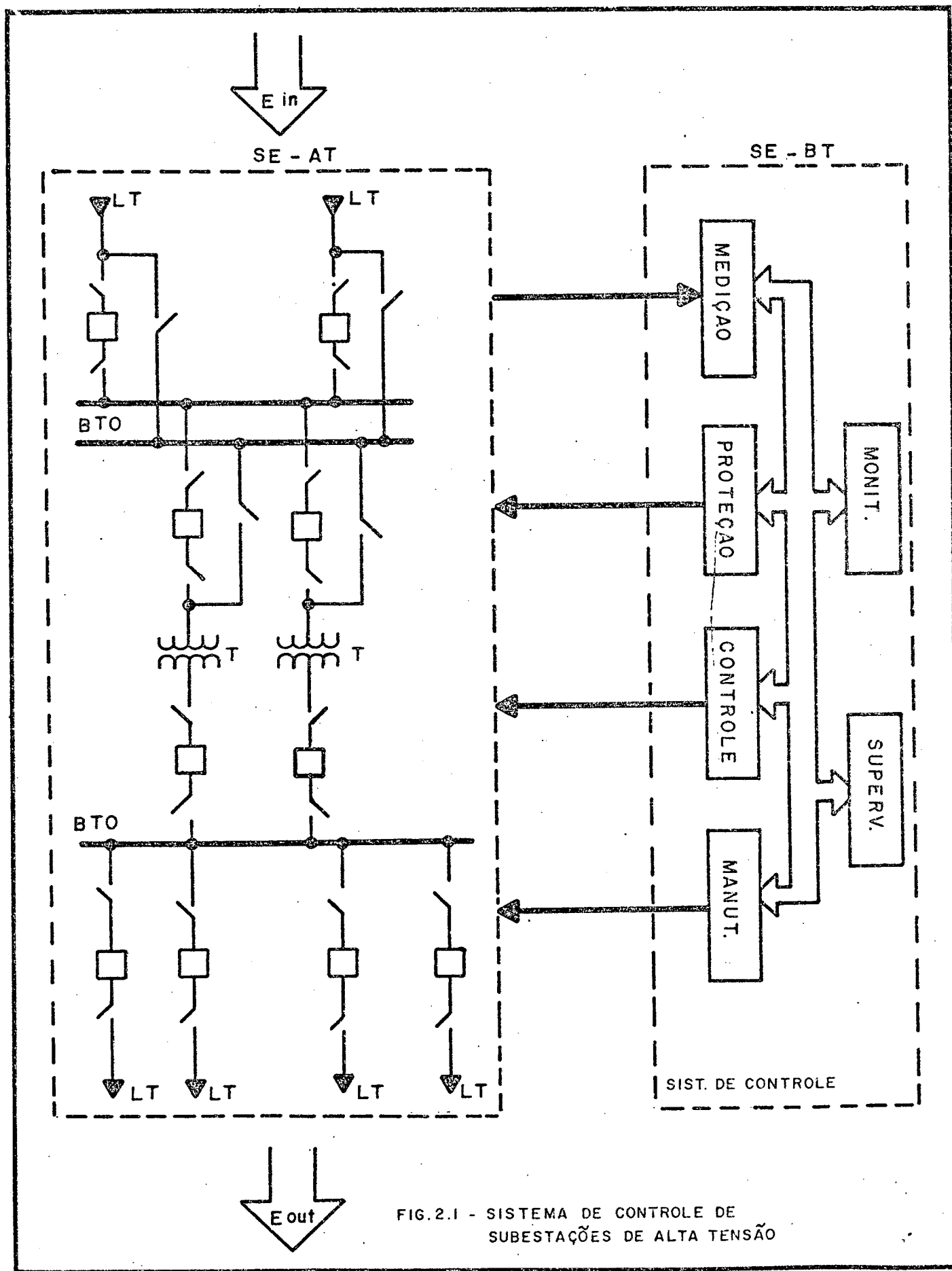


FIG.2.1 - SISTEMA DE CONTROLE DE SUBESTAÇÕES DE ALTA TENSÃO



- .1. Medição: Consiste na obtenção das grandezas elétricas envolvidas no processo, tais como tensão, corrente, potência, frequência, status dos equipamentos, etc.
- .2. Monitoração: Permite o acompanhamento da situação de operação do sistema no que diz respeito a visualização e/ou registro dos dados obtidos direta ou indiretamente a partir do processo de medição.
- .3. Proteção: Garante a integridade do sistema e dos equipamentos, fazendo com que os defeitos sejam eliminados de maneira coordenada, rápida e confiável.
- .4. Supervisão: Permite determinar a situação das linhas que saem e/ou entram da subestação e dos seus equipamentos internos, tais como transformadores e disjuntores, afim de poder acompanhar, instante a instante, as condições reais de operação, emitindo alarmes quando ocorrerem defeitos, impedindo manobras que possam comprometer o sistema e/ou equipamentos (intertravamentos) e coordenando, quando necessário, o fluxo de informações entre os vários elementos integrantes da subestação. A supervisão deve ser também capaz de detetar a necessidade de execução de serviços de manutenção, sejam estes de caráter corretivo ou preventivo.
- .5. Controle: Permite agir sobre o sistema, fazendo com que operações automáticas ou manuais levem os equipamentos, e por consequência, toda a subestação, a uma situação

prevista e desejável, viabilizando as necessárias mudanças na topologia da rede, por conveniência da operação do Sistema Elétrico;

- .6. Manutenção: Permite que eventuais danos ou defeitos apresentados em equipamentos ou partes da instalação sejam corrigidos (manutenção corretiva) e também através de uma atuação preventiva, reduzam a probabilidade de ocorrência destes danos ou defeitos (manutenção preventiva).

As funções do Sistema de Controle podem ser realizadas por ação automática ou por ação do operador. A escolha entre estas alternativas baseia-se em critérios ligados às viabilidades técnica e econômica, bem como ao grau de flexibilidade oferecido para operação, manutenção e futuras expansões, e ainda no desempenho e confiabilidade desejados.

### 2.3. OS SISTEMAS DE CONTROLE EM SUBESTAÇÕES DE ALTA TENSÃO:

O Sistema de Controle é uma necessidade básica das subestações, uma vez que, através dele têm-se condições de acompanhar todo o desenrolar do processo de transmissão e transformação da energia elétrica, bem como, quando necessário, atuar sobre este processo, seja para aumentar a eficiência e/ou segurança, seja para contornar situações de defeito. A seguir, são apresentadas algumas das alternativas existentes para Sistemas de Controle.

### 2.3.1. O Sistema Convencional de Controle.

Ainda hoje, um dos Sistemas de Controle mais usados em subestações é o que pode ser chamado de Convencional. Nele, todas as informações obtidas no processo de medição no pátio da subestação são trazidas à sala de controle, através de condutores elétricos, e são monitoradas em diversos instrumentos e diagramas sinóticos localizados em painéis na sala de controle. Da mesma maneira, todos os sinais de controle são levados através de condutores elétricos desde os painéis (onde se encontram dispositivos tais como: chaves, relés, etc.), até os equipamentos localizados no pátio (fig. 2.2).

Neste caso, todas as ações de Controle são executadas pelo operador, através do acionamento de chaves e botões de comando. Cabe ainda ao operador as tarefas de registro periódico por escrito das grandezas elétricas de interesse (corrente, tensão, energia, etc.) e o registro das eventuais ocorrências (alarmes, desligamentos, manutenções, etc.).

### 2.3.2. O Sistema Digital de Controle Centralizado:

Uma evolução do Sistema Convencional de Controle consiste em realizar um Sistema Digital de Controle Centralizado (SANTOS, 84). Neste caso, todas as grandezas analógicas e digitais são aquisitadas no pátio da subestação através de equipamentos convencionais e trazidas à sala de controle através de condutores elétricos, onde as grandezas analógicas são digitalizadas por transdutores, podendo assim serem processadas por computadores, monitoradas em terminais de vídeo, armazenadas em unidades de disco, etc. (fig. 2.3).

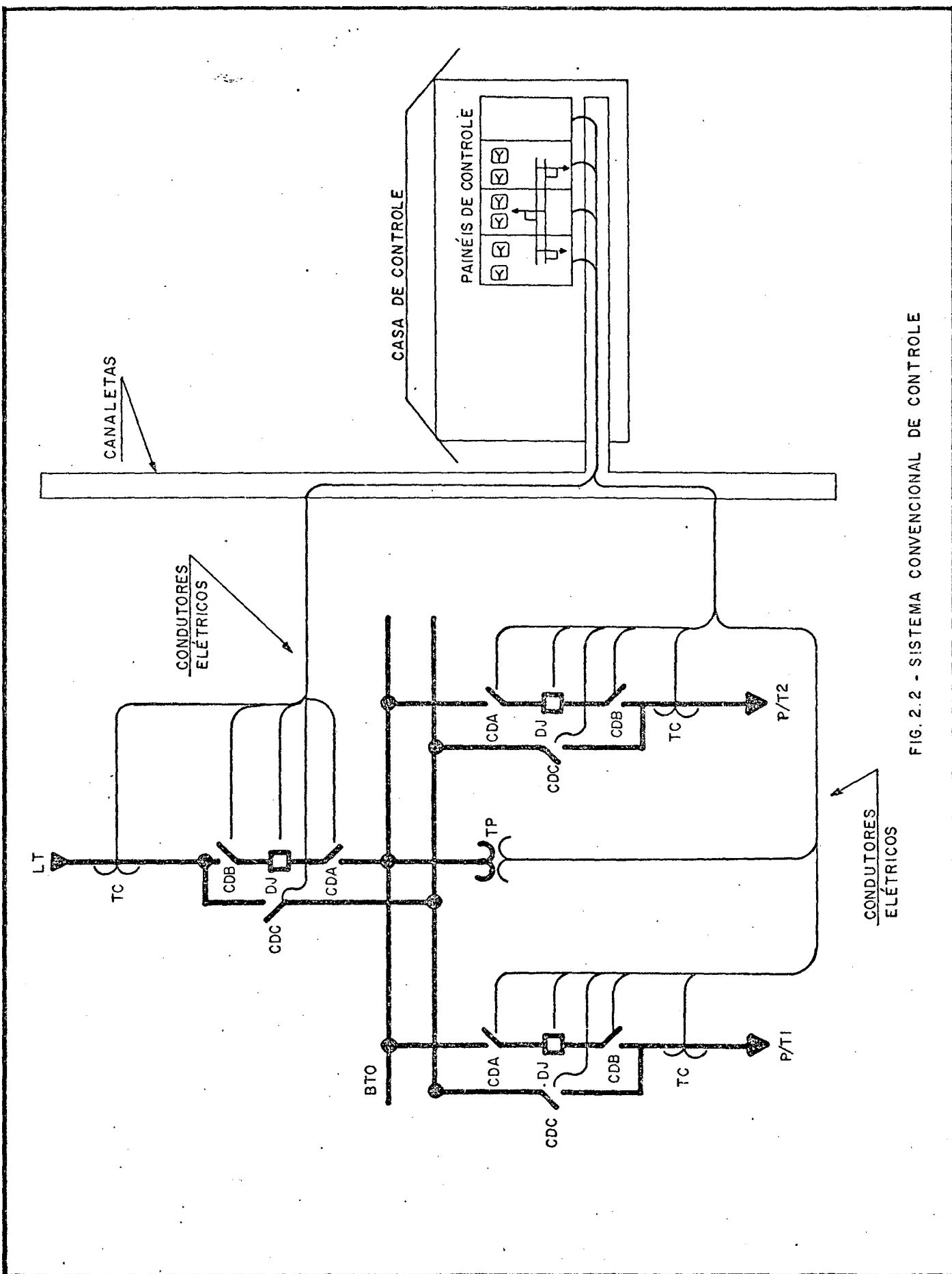


FIG. 2.2 - SISTEMA CONVENCIONAL DE CONTROL

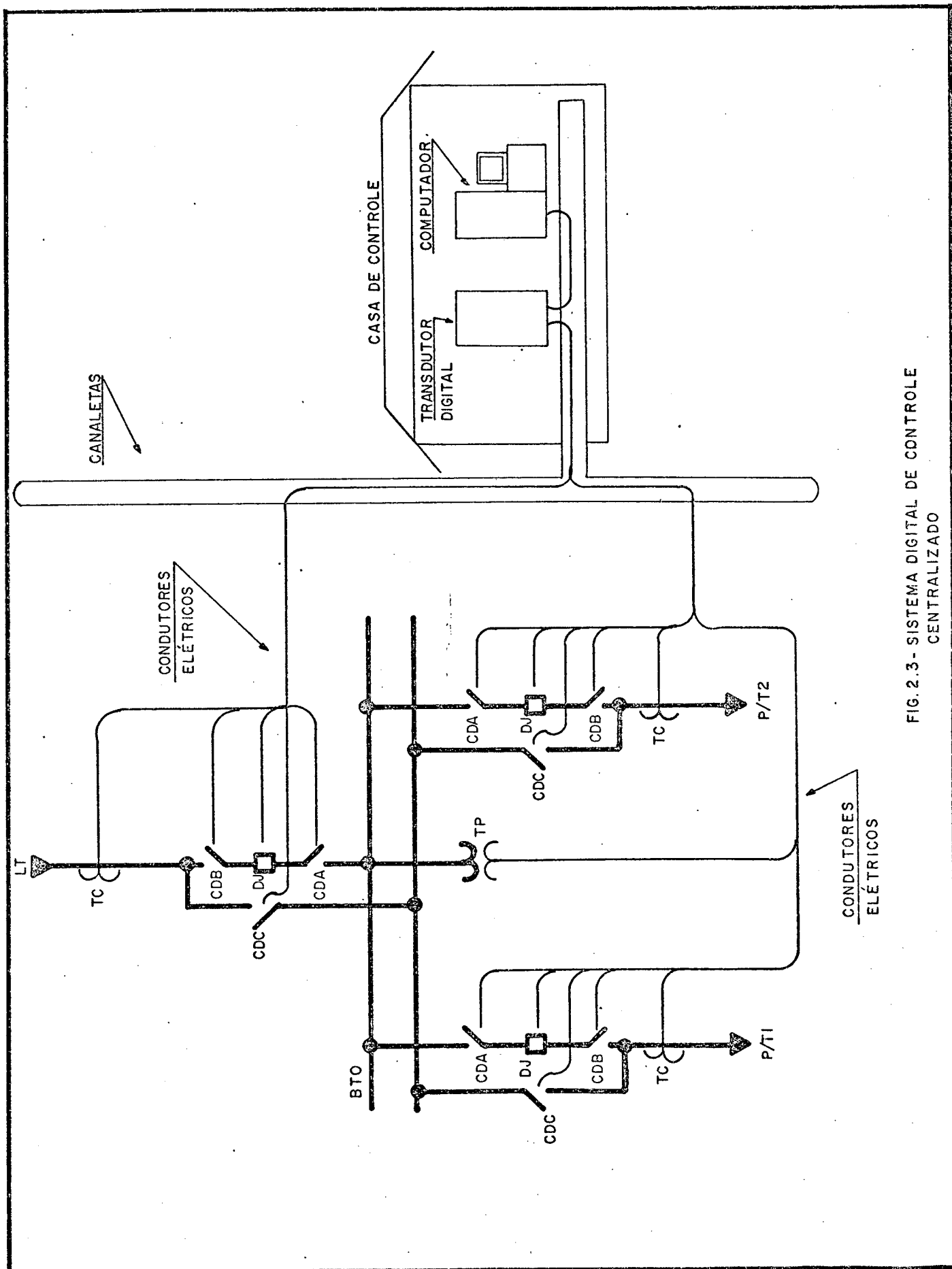


FIG. 2.3- SISTEMA DIGITAL DE CONTROL CENTRALIZADO

Todas as ações de Controle continuam a depender do operador, mas são executadas a partir do teclado de um computador. Além disto, seqüências inteiras de operações, podem ser programadas, o que permite a otimização de alguns procedimentos operacionais. Uma grande vantagem deste sistema consiste na eliminação dos painéis de monitoração e controle, uma vez que são substituídos por computadores, o que diminui o custo da instalação. Outras grandes vantagens proporcionadas por este sistema são o registro automático das grandezas elétricas de interesse, o registro cronológico das ocorrências e a possibilidade de interligação com uma estação que centralize a operação de todo o sistema elétrico (COS).

Convém notar que tanto no Sistema Convencional de Controle, quanto no Sistema Digital de Controle Centralizado, a função de proteção é ainda realizada através do uso de equipamentos convencionais (isto é, relês eletromecânicos ou eletrônicos, alimentados por sinais analógicos transmitidos por meio de condutores elétricos), mantendo assim, os custos e características ligados a infraestrutura necessária a sua instalação, ou seja, painéis e condutores elétricos.

### 2.3.3. O Sistemas Digital de Controle Distribuído:

A evolução mais recente baseia-se na utilização de Sistemas Digitais de Controle Distribuído (SDCD), que consiste na implementação de uma rede de microcomputadores fisicamente distribuída no pátio da subestação (fig. 2.4). A cada um destes microcomputadores, ou Estação Remota (ER), é atribuída uma ou

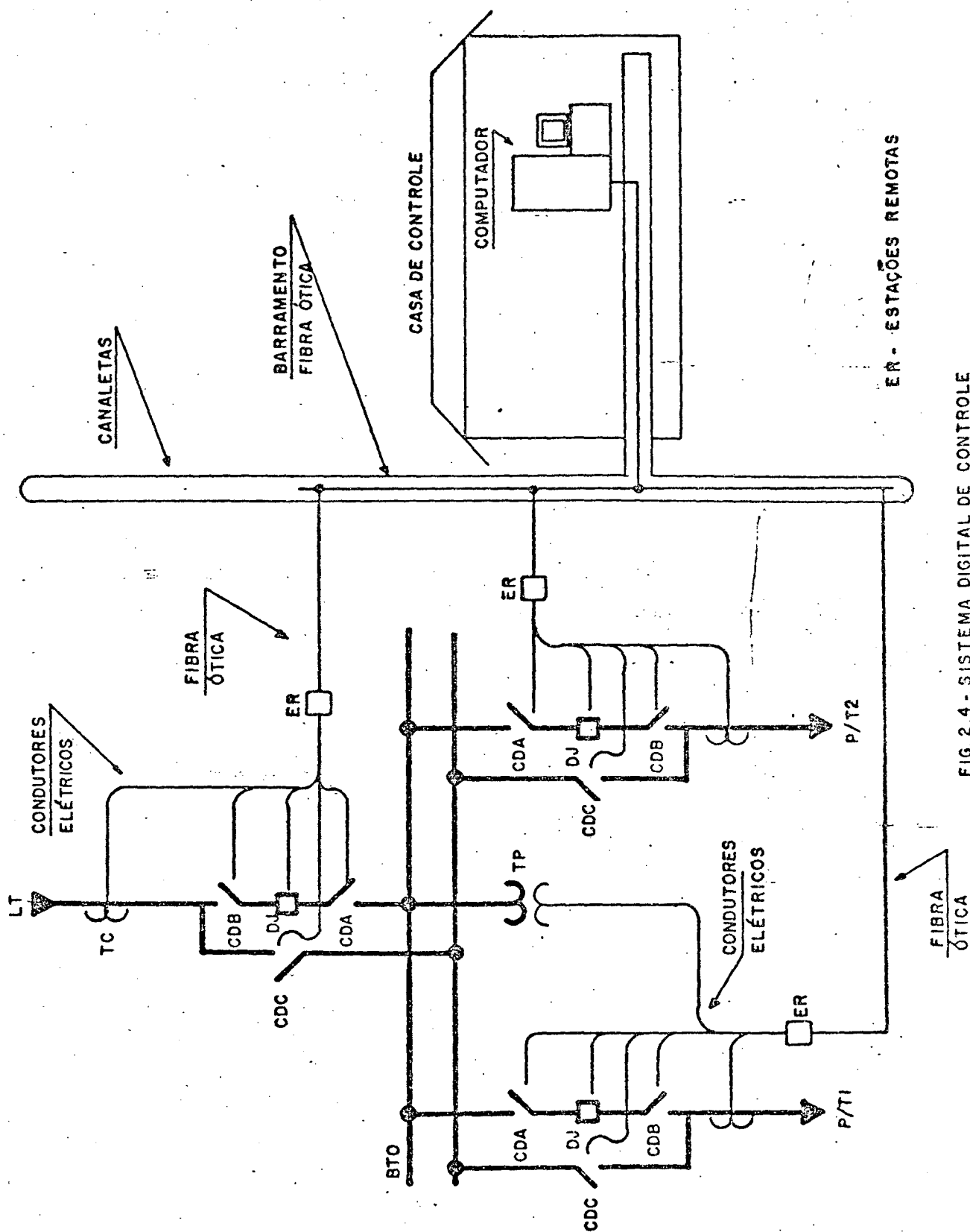


FIG. 2.4 - SISTEMA DIGITAL DE CONTROLE DISTRIBUIDO.

várias funções do sistema de controle associadas a um elemento da planta geral (bays, transformadores, sala de controle, etc.). As conexões entre os microcomputadores têm a possibilidade de serem feitas através de fibras óticas, que garantem alta imunidade contra interferência eletromagnética (EMI) e diminuem consideravelmente o custo de implantação, devido a eliminação de milhares de metros de condutores elétricos e dezenas de metros de canaletas. Desta maneira, já digitalizadas todas as informações são levadas a um computador localizado na Sala de Controle e podem ser processadas, monitoradas em terminais gráficos e impressoras. Este sistema além de apresentar todas as vantagens que o Sistema Digital Centralizado possui, do ponto de vista de tratamento, armazenamento de dados e de facilidades oferecidas ao operador, permite o processamento paralelo de suas funções, o que o torna mais adequado para controle em tempo real, e ainda uma maior redução no custo total da instalação.

Devido a diferença de requisitos para realizar as funções de proteção e as funções de controle, existem, na maior parte dos casos, redes diferentes para cada uma delas, embora algumas propostas existentes tentam solucionar o problema numa mesma rede.

#### 2.4. SISTEMAS DIGITAIS DE CONTROLE DISTRIBUÍDO EM SUBESTAÇÕES:

Atualmente, em muitos países, as principais funções dentro de uma subestação, tais como monitoração, supervisão, medição, controle e algumas funções de proteção, já estão em grande parte digitalizadas, quer sejam em protótipos, quer sejam em sistemas em operação. A digitalização da proteção, através do uso de



microcomputadores, somente começou a ser desenvolvida nestes últimos anos e tem sido objeto de concentração de pesquisas em países como França, Inglaterra, EUA, etc. (CIGRE,83), (CIGRE,86).

#### 2.4.1. Considerações a Respeito dos SDCD em Subestações:

##### .a. Benefícios Esperados:

O processo de digitalização das funções existentes numa subestação tornou-se viável graças aos benefícios que ele permite alcançar. Entre eles, pode-se citar (CIGRE,83):

- Maior confiabilidade devido principalmente às facilidades de autodiagnóstico, a capacidade de comunicação entre os processos e ao aumento da coerência e da precisão dos dados;
- Melhor desempenho devido ao aperfeiçoamento das funções de monitoração, de supervisão e de controle da subestação, isto é, devido a maior rapidez com que um conjunto de informações podem ser visualizadas, manipuladas e utilizadas para uma tomada de decisão;
- Tomada de decisões mais rápidas, seguras e otimizadas;
- Aumento da Automação: Tarefas que nos Sistemas Convencionais são feitas de maneira manual passam a ser feitas automaticamente, como por exemplo, a tarifação, registro de grandezas elétricas e de eventos, etc.;

- Maior acessibilidade aos dados permitindo o aprimoramento do desempenho de funções do sistema e redução da multiplicidade de sinais de controle;
- Diminuição nos custos de projeto, de implementação e de operação da subestação, que podem ser obtidos devido a:
  - padronização do hardware, criando dispositivos modulares que garantam facilidades de expansão e manutenção;
  - eliminação de cabos, canaletas, painéis e instrumentos de monitoração, supervisão, controle e proteção;
  - flexibilidade na mudança das características de operação (realizadas apenas por software);
- Menor Interferência Eletromagnética (EMI) devido ao possível uso de fibras óticas para transmissão das informações;
- Nova filosofia de projeto de subestações.

.b. Dificuldades Atuais:

O processo de digitalização das funções de uma subestação encontra-se ainda na sua fase inicial e existem algumas questões básicas a serem respondidas (CIGRE,83) que dizem respeito a:

- Experiência limitada com o uso e desempenho de computadores digitais em ambientes agressivos (com alto

nível de ruído) como o das subestações;

- Alto custo do software, devido a problemas de manutenção e transportabilidade;
- Compatibilização com tecnologias convencionais atualmente presentes nas subestações;
- Conveniência e forma de introdução da tecnologia de Sistemas Digitais de Controle Distribuído em subestações;
- Impacto da nova tecnologia sobre pessoas e organizações acostumadas com tecnologias convencionais;
- Requisitos para expansão e evolução: O desenvolvimento do Sistema de Controle Distribuído deve levar em consideração a velocidade, as tendências do avanço tecnológico e também a diversidade de construtores e seus respectivos equipamentos; torna-se necessário adotar uma filosofia de projeto de "sistemas abertos" (BORNARD, 86) baseados em padrões internacionais (ISO, MAP), que permitirão esta evolução e expansão.

#### .c. Evolução dos SDCD's em Subestações de Alta Tensão:

O processo de evolução dos SDCD's em subestações passa por duas etapas distintas:

- Etapa 1: - desenvolvimento do sistemas de medição, monitoração, supervisão e controle; a proteção continua sendo feita por equipamentos convencionais;

- desenvolvimento de funções não críticas ao sistema, tais como funções de auxílio a operação, manutenção, etc.;
- Etapa 2: desenvolvimento do sistema de proteção. A proteção tem sido deixada por último devido à existência de equipamentos de proteção, com tecnologia do estado sólido, que apresentam alta confiabilidade e velocidade de operação, o que reduz a urgência de implementação de sistemas ainda mais eficientes e confiáveis e, sobretudo, por exigir a adoção de requisitos bem mais severos do que nos sistemas anteriores (p.ex.: taxa de transmissão de dados e confiabilidade). Existem, a nível mundial, pesquisas destinadas a atender a estes requisitos afim de tornar este sistema realizável e competitivo com os sistemas convencionais de proteção (CIGRE,86).

#### 2.4.2. Organização Funcional dos SDCC:

Dentro da subestação, o sistema de controle pode ser organizado em vários níveis que agrupam as suas funções principais. A classificação proposta em (BORNARD,86) mostra a distribuição destas funções em três níveis indicando os tipos de dados em cada nível e as necessidades em termos de comunicação entre níveis.

.a. Nível 0 ou Nível Circuito:

Este é o nível que permite a conexão propriamente dita do Sistema de Controle aos equipamentos da subestação. Dois tipos de dados transitam neste nível:

- Dados relacionados às medições de grandezas analógicas de Alta ou Baixa Tensão. Atualmente estes dados são obtidos através de Transformadores de Corrente e Tensão, que permitem que as grandezas elétricas sejam reduzidas a níveis passíveis de serem tratados por um equipamento de conversão análogo/digital,
- Dados relacionados às grandezas digitais, como medição de status dos equipamentos e sinais de comando a serem enviados para os equipamentos. A leitura de status, bem como o envio dos sinais de comando, são feitos diretamente sobre o equipamento, como por exemplo, nos contatos auxiliares e bobinas de comando de disjuntores, nas chaves seccionadoras e comutadores de tensão de transformadores. O armazenamento dos dados é localizado e o tempo de retenção dos mesmos é muito pequeno. A velocidade de aquisição deve ser compatível com as necessidades de processamento do nível 1.

.b. Nível 1 ou Nível Bay:

Tem sob sua responsabilidade basicamente as funções de cálculo de grandezas elétricas, controle e proteção a nível

local.

Estas funções podem ser classificadas em três categorias, com ordem crescente em relação a confiabilidade operacional e potência computacional necessária para sua execução em tempo real:

- Funções relacionadas com monitoração, supervisão, controle e auxílio da operação, como por exemplo, cálculo de grandezas elétricas (potência ativa, potência reativa, energia ativa, energia reativa, tensão eficaz, corrente eficaz, frequência, fase, etc.), registro e localização de eventos ou faltas, execução de seqüências de operações pré-programadas, intertravamentos entre equipamentos de um ou vários bays, paralelismo de transformadores e operação local de equipamentos;
- Funções relacionadas à proteção contra situações anormais ou potencialmente perigosas, como sobrecarga em linhas e transformadores, desbalanceamento de fases, regulação de tensão em transformadores e restauração automática do sistema;
- Funções relacionadas à proteção contra faltas em linhas, transformadores, barramentos e falhas em disjuntores.

Os dados são fornecidos ao nível 1 pelo nível 0 com taxas de transmissão elevadas e permitem realizar todas as funções desejadas, inclusive o traçado de oscilogramas. Eles

são armazenados em base de dados de tamanho reduzido e necessitam de um tempo de retenção pequeno..

.c. Nível 2 ou Nível Subestação:

É composto por uma estação central (EC) instalada na sala de controle que agrupa as funções que manipulam as informações provenientes das várias estações remotas. Permite fornecer ao operador uma visão completa da situação operacional da subestação, bem como executar funções de controle, até se comunicar com o Centro de Operação do Sistema. Algumas das funções realizadas neste nível são:

- Monitoração e controle da subestação através de terminais gráficos e teclado;
- Registro das grandezas elétricas e eventos;
- Interface com o sistema remoto de Supervisão e Controle;
- Auxílio à operação e à manutenção;
- Informações adicionais para o operador.

No Nível 2, a base de dados é de grande capacidade e pouco dependente do tempo; ela armazena todas as informações necessárias para fins de tomada de decisões e outros processamentos de baixa velocidade, tais como impressão de relatórios, entre outros.

### 2.4.3. Requisitos de Comunicação:

A distribuição das funções torna necessária a troca de informações entre os vários níveis do Sistema de Controle e entre unidades de um mesmo nível. O uso de redes locais permitirá concentrar algumas funções nos sítios mais apropriados e coordenar a comunicação de dados entre os vários sítios.

Os dados a serem transmitidos dentro de um Sistema de Controle podem ser classificados em três tipos, em função de requisitos como tempo, segurança, quantidade e precisão (BORNARD, 86), (BOURDE, 84):

- Dados para Supervisão: Incluem todos os dados necessários para monitoração, alarmes, localização de faltas, registro cronológico de eventos e execução de comandos recebidos de um centro de controle. Devido a sua grande quantidade, estes dados são acessados aleatoriamente e ocupam de maneira importante o sistema de comunicação;
- Dados para Controle Automático: Incluem os dados necessários para a execução das tarefas de controle de baixa velocidade (tempo maior que 1s - p.ex. seqüências de manobras) e para a execução de tarefas de controle de maior velocidade (tempo entre 10ms e 300ms - p.ex. comandos de abertura e fechamento de chaves e disjuntores, mudança de taps nos transformadores). Envolvem um número relativamente pequeno de dados; mas que devem ter um tempo máximo de acesso garantido e um alto grau de segurança operacional.
- Dados para Proteção: Incluem os dados necessários para o



sistema de proteção, obtidos por amostragem de Corrente e Tensão das partes a serem protegidas. A aquisição e o tratamento destes dados devem se dar em alta velocidade e devem ser síncronos para que as informações sobre a fase possam ser obtidas. A velocidade de transmissão destes dados deve também ser elevada, na ordem de 2 a 3ms, p.ex., para transmitir ações de comando rápidas sobre disjuntores. Estes dados devem, também, ter um alto grau de segurança.

#### 2.4.4. Aspectos da Arquitetura dos SDCD em Subestações:

##### .a. Topologia:

São várias as maneiras de se configurar fisicamente um Sistema Distribuído, sendo que algumas são clássicas. Dentre elas, podemos citar:

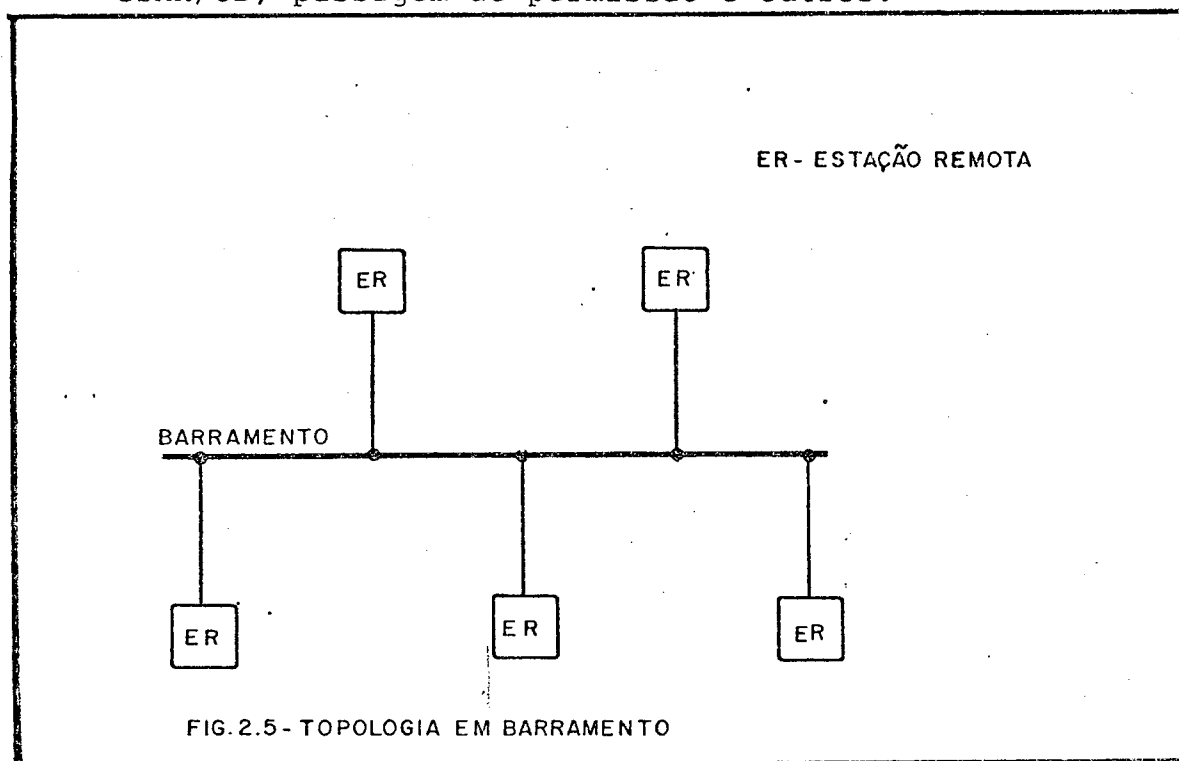
##### .a.1. Topologia Radial:

É um arranjo que torna o sistema pouco eficiente, pouco seguro e lento, pois atribui a um nó central toda a tarefa de coordenar a comunicação entre os sítios remotos. É uma opção a rejeitar.

##### .a.2. Topologia Barramento:

Esta topologia (fig. 2.5) caracteriza-se pelo fato de todos os nós da rede estarem conectados a um meio comum de comunicação. Isto possibilita a difusão de

mensagens da rede. O controle de acesso a este meio de comunicação é feito através de algoritmos do tipo CSMA/CD, passagem de permissão e outros.

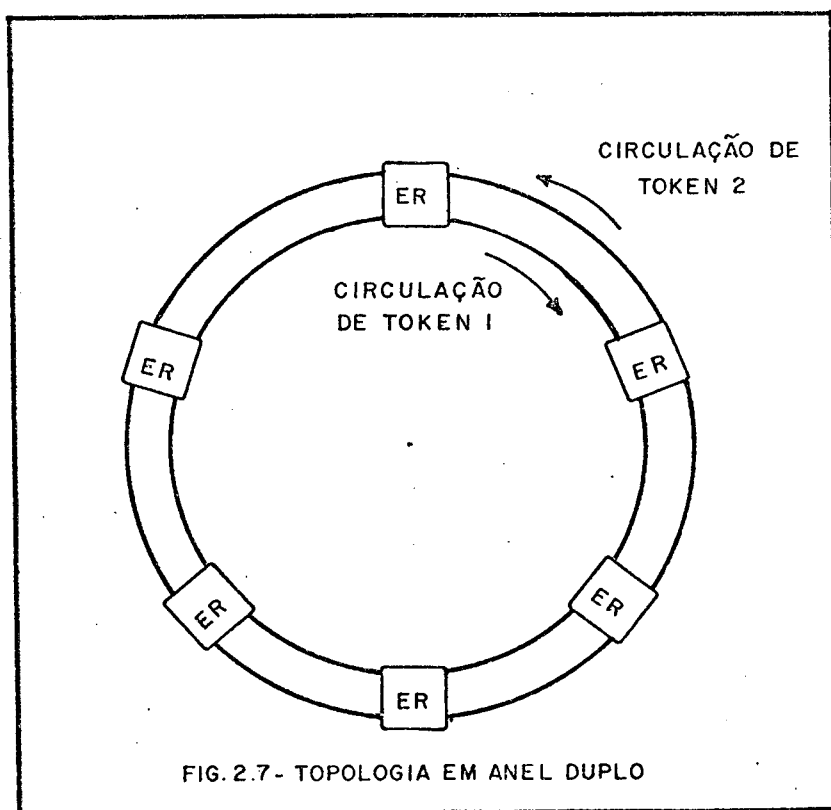
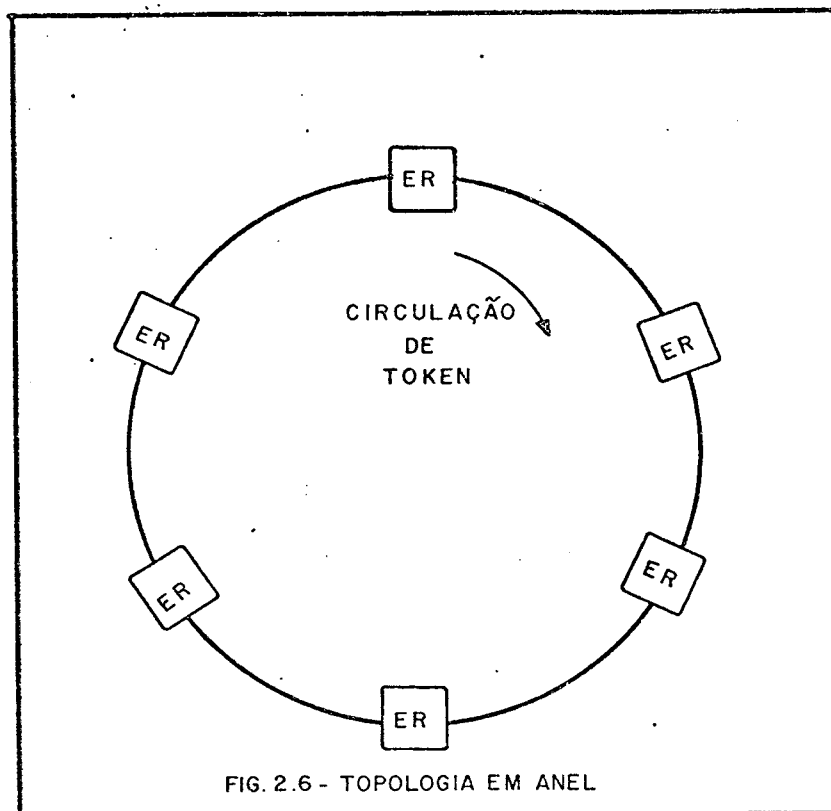


### .a.3. Topologia em Anel:

A principal característica deste arranjo (fig. 2.6) é que a comunicação entre um nó origem e um destino se dá pela retransmissão da mensagem pelos nós intermediários. Afim de aumentar a confiabilidade deste arranjo, um segundo anel pode ser colocado, no qual as mensagens circulam simultaneamente ao primeiro anel, mas em sentido contrário (fig. 2.7).

### .b. O Meio de Comunicação:

A escolha do meio a ser utilizado numa rede local é função principalmente da velocidade de comunicação



necessária e das características ambientais onde a rede está instalada.

Num SDCD em subestação existe a necessidade de alta velocidade de transmissão de dados, mas principalmente, existe a necessidade de um meio de comunicação com alta imunidade contra ruídos, cujos níveis numa subestação, são bastante elevados.

Devido a estes fatos, existe uma grande tendência (CIGRE,83), (BOURDE,84), (BORNARD,86) na escolha da fibra ótica como meio de comunicação, pois esta permite altas taxas de transferência de dados e alta imunidade contra interferência eletromagnética (EMI). Entretanto, existem ainda hoje algumas dificuldades na construção de redes com fibra ótica, tais como, perdas e conexões, entre outras.

#### .c. Protocolos:

O protocolo do acesso à rede mais difundido é o tipo CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access / Collision Detection). Este protocolo é utilizado em redes com topologia de barramento e pode, de maneira bem simplificada, ter seu funcionamento descrito pelo seguinte algoritmo:

- Um elemento conectado à rede local necessita utilizá-la e tenta o acesso;
- Se a rede estiver livre, o acesso é conseguido;
- Se a rede estiver sendo utilizada, fica "escutando-a" até que seja liberada, quando então, tenta um novo

acesso;

- Se dois elementos tentam simultaneamente acessar a rede, é detetada uma colisão, e ambos esperam um tempo aleatório para tentar um novo acesso.

Como vantagens da utilização deste protocolo, pode-se citar simplicidade operacional, fácil implementação e maior disponibilidade no mercado.

A principal desvantagem é não haver a garantia de um tempo máximo de acesso, uma vez que o processo é não determinístico. Desta forma, este protocolo pode tornar-se inadequado quando requisitos estritos de tempo são exigidos, como pode ser o caso da função de proteção.

Para eliminar esta desvantagem, vários protocolos fundamentados na filosofia de "Passagem de Permissão" estão sendo desenvolvidos. Basicamente, o processo consiste em fazer circular, na rede, uma "permissão" (token) que assegura a quem a possuir, o direito de acessar à rede. Como a circulação desta permissão se dá dentro de limites de tempo perfeitamente definidos, fica garantido que num tempo máximo conhecido, um elemento conectado à rede, certamente poderá acessá-la.

Esta filosofia tem servido de ponto de partida para o desenvolvimento de protocolos mais eficientes para serem utilizados quando se tem restrições de tempo fortes, como por exemplo, no sistema de proteção.

#### 2.4.5. Interface Homem-Máquina:

A Comunicação Homem-Máquina é feita, via de regra, em terminais gráficos de vídeo. Algumas das facilidades que esta interface deve permitir são:

- Monitoração de informações analógicas e digitais instantâneas (status, valores de grandezas elétricas, alarmes, etc.);
- Apresentação de diagramas unifilares espelhando o funcionamento de setores da subestação;
- Inicialização de seqüências de manobras ou execução de manobras isoladas;
- Acompanhamento da operação dos equipamentos;
- Orientações no atendimento à contingências, isto é, que providências tomar no caso de desligamentos de linhas e/ou transformadores.

#### 2.4.6. Dois Exemplos de SDCD:

Com o objetivo de detalhar mais algumas das características de um SDCD, serão apresentadas, a seguir, duas propostas diferentes, desenvolvidas pelo CEPEL-ELETROSUL (Brasil), no projeto DIPROS e outra pela EDF (França) e destacadas as diferenças entre elas.

.a. Rede de medição DIPROS:

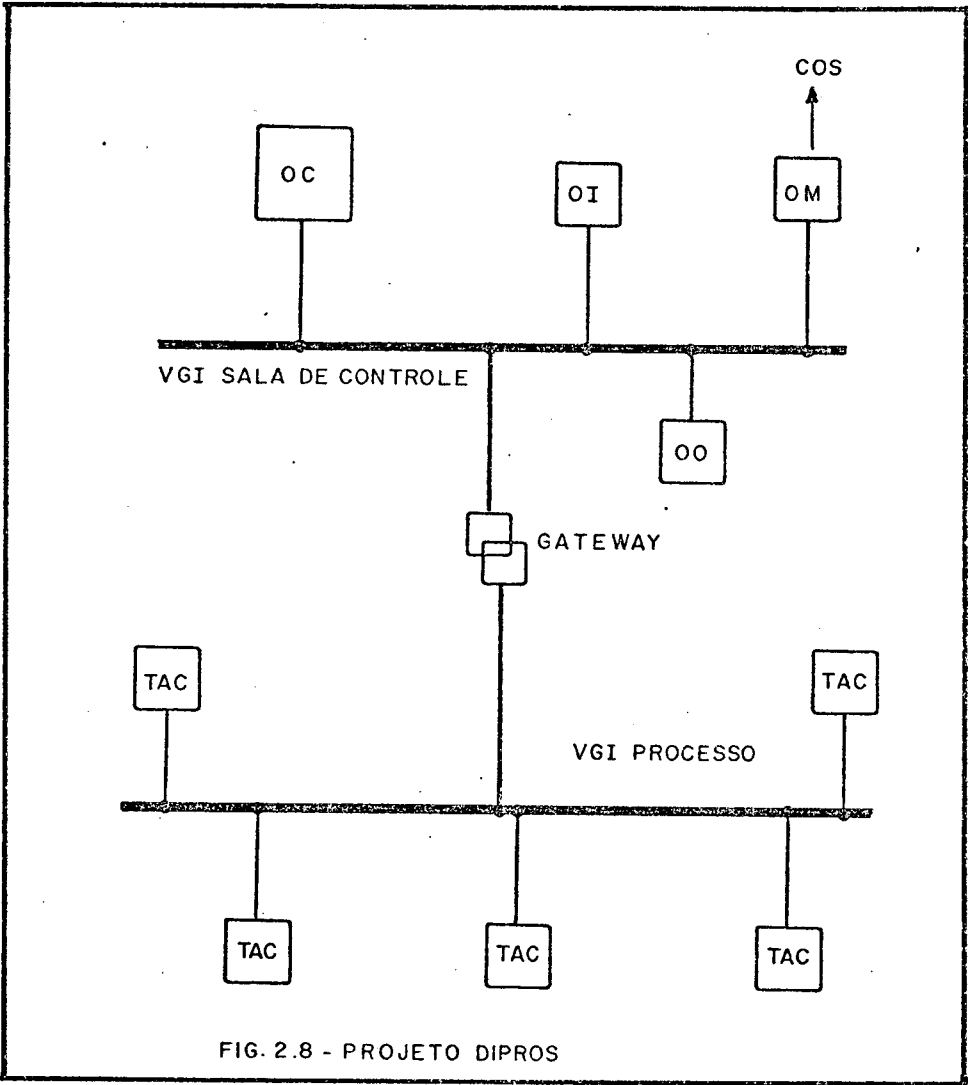
Na fig. 2.8, é apresentada a proposta de protótipo que está sendo desenvolvido pelo CEPEL-ELETROSUL, no Projeto DIPROS (CEPEL,84). Os dados obtidos na medição atenderão às necessidades de monitoração, supervisão e controle. No que concerne à função proteção, prevê-se o desenvolvimento posterior de uma rede específica de características próprias (dados adquiridos, taxa de transmissão, segurança, etc.).

.a.1. Descrição:

Em cada bay é instalado um TAC (Terminal de Aquisição e Controle), que tem como finalidades básicas fazer as leituras de corrente e tensão, verificação de status de equipamentos e executar ações de comando sobre estes equipamentos. Além disto, os TAC's tem capacidade de processar seqüências automáticas de manobras, fazer a verificação das condições de intertravamento, realizar seqüências de comando, calcular grandezas elétrica, tais como Potência, Energia e outras. Em resumo, sob sua responsabilidade estão as funções correspondentes aos níveis 0 e 1 da organização funcional de um SDCD em subestação.

Na sala de controle, ficam instalados os Operadores da Sala de Controle que são responsáveis pela Interface Homem-Máquina e que possuem funções bem definidas, que são:

- Operador de Controle (OC) - Responsável pela apresentação do estado atual da subestação, pela emissão de relatórios, registro de alarmes e armazenamento de informações.





- Operador de Impressora (OI) - Responsável pelo registro escrito de relatórios periódicos e de contingências.
- Operador de Observação (OO) - Responsável pela supervisão do Sistema Digital de Controle.
- Operador Mestre (OM) - Responsável pela comunicação com o Centro de Operação do Sistema (COS).

As funções dos Operadores da Sala de Controle correspondem às atribuídas ao nível 2.

#### .a.2. Comunicação:

Os TAC's e os Operadores da Sala de Controle estão conectados a uma rede denominada VGI (Via Geral de Interconexão). Esta rede é composta por duas sub-redes:

- VGI da Sala de Controle - Responsável pela troca de informações entre os operadores da Sala de Controle. O suporte físico é um cabo coaxial conectado com topologia de barramento.
- VGI do Processo - Responsável pela troca de informações entre os TAC's, pelo envio de dados à Sala de Controle, de recepção de sinais de controle para o processo enviados da Sala de Controle. O suporte físico é um cabo ótico conectado com topologia de barramento.

A conexão entre as duas sub-redes é feita por um

"GATEWAY". cuja finalidade é interligar diferentes redes ou diferentes meios de comunicação. Desta forma, consegue-se compatibilizar meios de comunicação com diferentes características de propagação, bem como otimizar o uso do sistema global com a utilização das sub-redes. No caso em questão, tem como finalidade interligar redes com funções distintas, sendo ainda uma construída com fibra ótica (rede de medição) e outra com cabo coaxial (rede Homem-Máquina). O método de acesso usado na rede é o CSMA/CD com protocolo de enlace SDLC.

#### .a.3. Esquema Básico de um TAC:

Um TAC consiste de três operadores de medição e controle, de um Controlador de TAC, e de um meio interno de comunicação (fig. 2.9).

- Operador de Aquisição de Dados Analógicos (ADA): Realiza a aquisição das grandezas analógicas do bay;
- Operador de Aquisição de Dados Digitais (ADD): realiza a aquisição do status de equipamento do bay;
- Operador de Saída de Controle (SC): envia os sinais de comando e operação dos equipamentos do bay;
- Controlador de TAC (CTAC):
  - realiza o cálculo de todas as grandezas elétricas necessárias ao processo, tendo como base os dados fornecidos pelo módulo ADA;
  - possui seqüências programadas de manobras que, quando

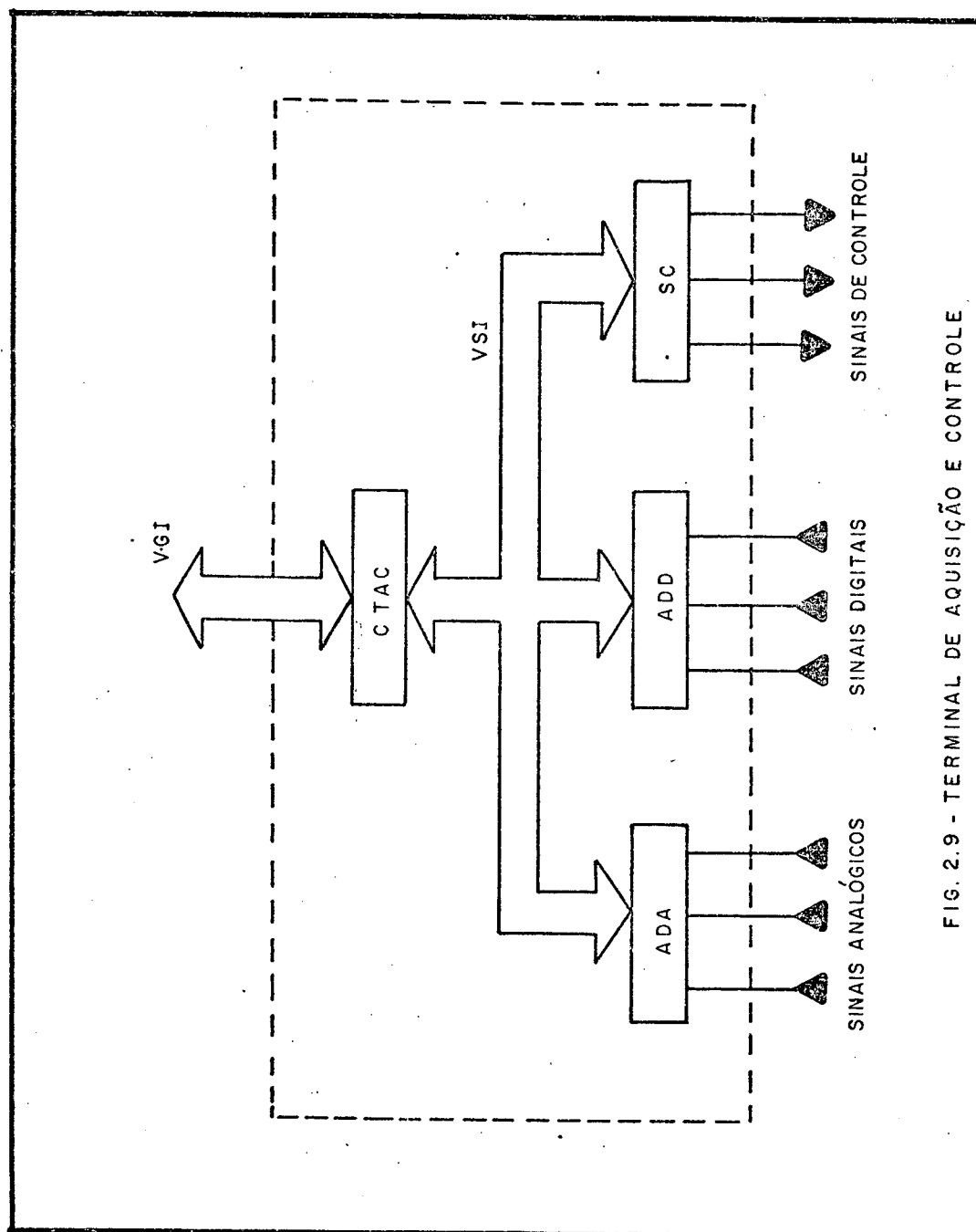


FIG. 2.9 - TERMINAL DE AQUISIÇÃO E CONTROLE

autorizadas pelo operador, podem ser feitas automaticamente;

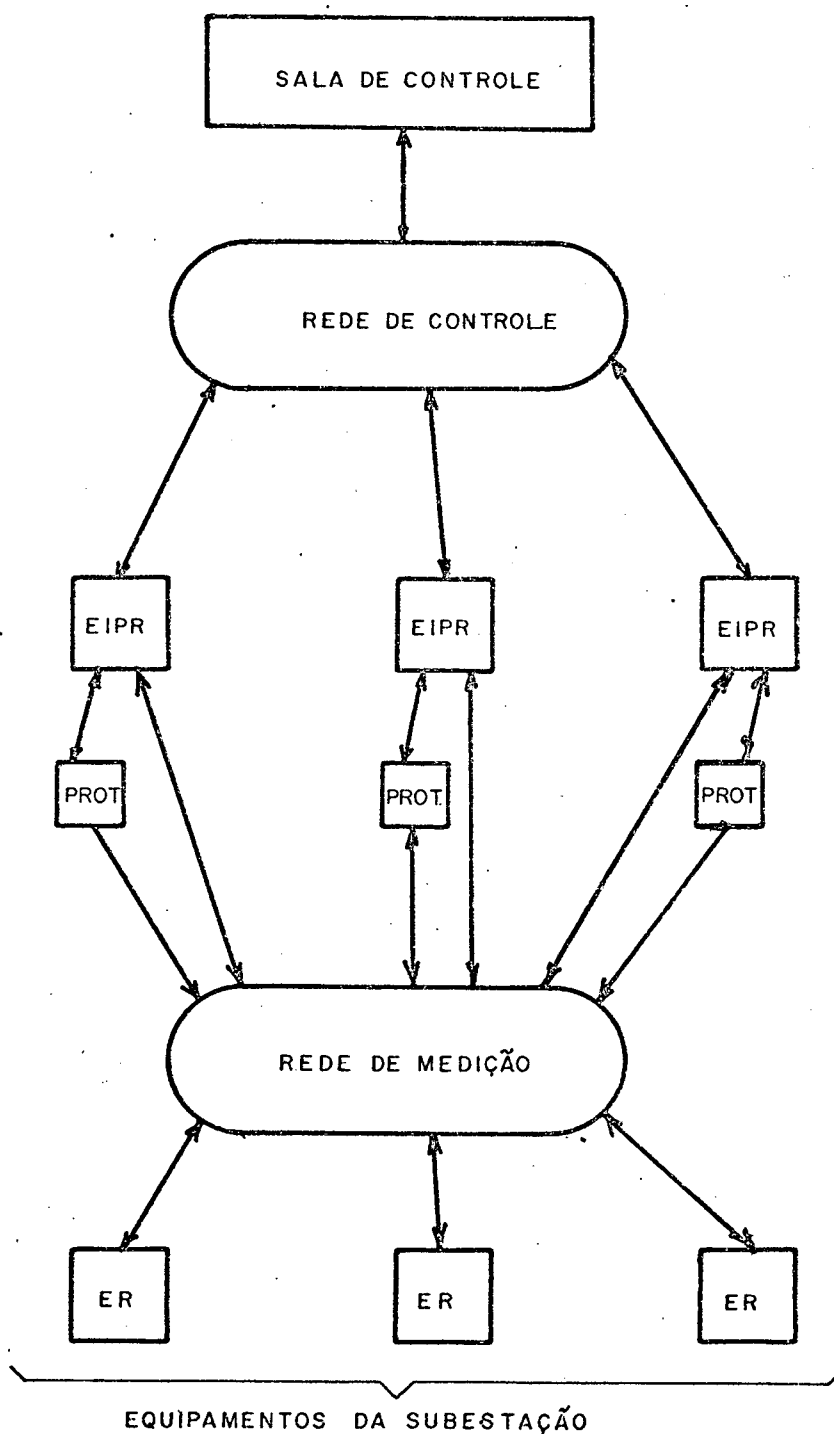
- verifica as condições de intertravamento existentes no bay através de dados fornecidos pela ADD e se necessário, por outros TAC's;
- realiza a comunicação entre outros TAC's e o Operador de Controle da Sala de Controle, recebendo deste sinais de controle e enviando dados relativos às medições de grandezas elétricas e status de equipamentos e dispositivos de supervisão.
- garante o sincronismo entre todas as TAC's.

A Via Singela de Interconexão (VSI) permite a comunicação entre os operadores e o controlador do TAC.

Neste ponto é possível fazer distinção entre os níveis 0 e 1 de organização funcional apresentada. Ao nível 0 correspondem os operadores ADA, ADD e SC, e ao nível 1, o controlador de TAC.

#### .b. Rede de Medição e Proteção EDF:

Na fig. 2.10, é mostrada uma proposta de rede de medição e proteção que está sendo desenvolvida pela Electricité de France (EDF) (BORNARD,86). Uma característica interessante é a inclusão de uma rede de medição de alta velocidade onde os dados obtidos na medição são colocados a disposição dos níveis superiores. As características da rede



2.10-SDCD COM REDE PARA MEDIÇÃO E PROTEÇÃO

de medição, bem como da medição propriamente dita, são tais que permitem que estes dados sejam utilizados tanto para controle e supervisão como para proteção.

As Unidades Locais (UL's) fazem a aquisição de dados (corrente, tensão, status, frequência), em alta velocidade e os colocam disponíveis numa rede de medição com características de acesso de alta velocidade. A unidade EIPC (Equipamento Integrado de Proteção e Controle), através de acesso à rede de medição, realiza as tarefas pertinentes ao nível 1.

Convém notar que a EIPC também recebe informações do Sistema de Proteção, que por sua vez, adquire dados também da rede de medição. Todas as informações processadas pela EIPC são colocadas na rede de controle e ficam a disposição no nível 2.

## 2.5. SITUAÇÃO DO PRESENTE TRABALHO:

Apesar de todo automatismo possibilitado pelo uso de Sistemas Digitais de Controle, algumas funções dentro da subestação ficam, ainda hoje, em muitos casos, a cargo do elemento humano (o operador). Estas funções podem ser definidas a partir das tarefas que o operador deve executar, as quais estão sempre relacionadas a presença de uma situação anormal, que pode ou não estar vinculada à ocorrência de uma contingência.

### 2.5.1. Tarefas Vinculadas a uma Contingência:

a. Determinar A CAUSA da operação de disjuntores, cuja

abertura pela proteção é supervisionada por dispositivos de alarme. Ela consiste em determinar os eventos que provocaram a atuação dos dispositivos de proteção, que por sua vez, abriram os disjuntores.

- .b. Determinar COMO se deu a abertura dos disjuntores, isto é, verificar se houve a atuação correta da proteção e dos disjuntores propriamente ditos, levando em conta os seguintes fatores:

- Topologia da subestação antes e depois da contingência;
- Informações a respeito de quais relés atuaram;
- Informações a respeito de quais disjuntores abriram.

- .c. Determinar O QUE FAZER para que o sistema retorne às condições de operação.

#### 2.5.2. Tarefas não Vinculadas a Contingências:

- .a. Determinar A CAUSA da atuação dos alarmes de supervisão de equipamentos diversos;
- .b. Determinar A CAUSA do mal funcionamento de equipamentos não sujeitos à supervisão de alarmes.

#### 2.5.3. Funções do Operador:

Todas estas tarefas podem ser agrupadas nas seguintes funções:

- .a. Atendimento de Contingências: Determinar as seqüências operacionais para o reestabelecimento do sistema elétrico;
- .b. Tratamento de Alarmes: Determinar a(s) causa(s) da atuação de um ou mais alarmes;
- .c. Diagnóstico de Defeitos: Determinar a(s) causa(s) do não funcionamento ou mal funcionamento de equipamentos e circuitos;
- .d. Diagnóstico de Faltas: Verificar se a operação de relés e disjuntores foi correta, isto é, verificar se houve operação de proteções de retaguarda ou transferência de trip;.

Devido ao seu limitado campo de atuação dentro da subestação, a função Diagnóstico de Faltas é mais interessante quando aplicada a todo o sistema elétrico, a partir do Centro de Operação do Sistema, deixando assim de ser uma atribuição do operador local; por esse motivo, não será implementada no presente trabalho. Em (CARDOZO,86) (KOMAI,86) são mostrados exemplos de implementação desta função.

#### 2.5.4. Proposta de Trabalho:

Visando auxiliar e agilizar o desempenho do operador na execução das tarefas acima citadas, propomos o desenvolvimento um Sistema Especialista capaz de, a partir dos dados disponíveis, auxiliar o operador na tomada de decisões e emitir diagnósticos de



maneira rápida e confiável.

## 2.6. CONCLUSÃO:

Neste capítulo, foram apresentadas as funções de um Sistema de Controle para Subestações de Alta Tensão e a evolução desde o Sistema Convencional de Controle até o Sistema Digital de Controle Distribuído. A seguir foram descritas algumas das arquiteturas possíveis para estes sistemas, destacando as funções atualmente automatizadas e as funções ainda a cargo do Operador. Com o objetivo de melhorar o desempenho e a confiabilidade das funções de controle, foi proposta a realização de um Sistema Especialista, que será descrito nos capítulos seguintes, para auxiliar o operador nas suas tomadas de decisões.

## CAPÍTULO 3

### INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

#### 3.1. INTRODUÇÃO:

Neste capítulo serão brevemente apresentados os conceitos básicos de Inteligência Artificial (IA), destacando, em particular, os processos de procura e de representação do conhecimento. A seguir, serão feitas considerações gerais sobre o tipo de aplicação da Inteligência Artificial que será abordado neste trabalho: os Sistemas Especialistas.

#### 3.2. UMA VISÃO HISTÓRICA DA EVOLUÇÃO DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL:

O conceito de computador inteligente possui limites que variam de acordo com a evolução da tecnologia. Na década de 50, após a construção dos primeiros computadores, chegou-se a criar a expressão "Cérebro Gigante" ou "Cérebro Eletrônico" para máquinas que realizavam pouco mais do que as quatro operações aritméticas elementares e que possuíam um processo de comunicação e programação extremamente rudimentar. Hoje, dificilmente alguém utilizaria tais nomes até mesmo para um complexo sistema computacional.

Apesar disto, a preocupação com a reprodução da Inteligência continuou e hoje existe uma área das Ciências da Computação que estuda a criação de uma Inteligência Artificial, que procura obter computadores que executem tarefas até agora consideradas

como reservadas ao homem. Em 1956, realizou-se uma conferência no Douthorth Collège(EUA), onde um grupo de cientistas firmou os fundamentos da Inteligência Artificial . Na década de 60, barreiras de ordem teórico/prática surgiram, e apesar de avanços terem sido obtidos, o ritmo das pesquisas diminuiu até a década de 70.

Nesta década, vários fatores contribuíram para a motivação das pesquisas nesta área, entre eles:

- o avanço tecnológico em direção a computadores com maiores potencialidades e menores custos, o que permitiu a disseminação das pesquisas;
- o entendimento de que a inteligência, ou a capacidade de resolver problemas depende mais da quantidade de conhecimento do que do processo de inferência utilizado.

A partir daí, houve um avanço bastante rápido nas pesquisas, e na metade da década de 70 grandes resultados foram obtidos. Os exemplos mais significativos são:

- Sistemas Especialistas como MYCIN, para diagnóstico de processos infecciosos e o PROSPECTOR para auxílio a prospecção geológica;
- Compreensão de frases em linguagens naturais, em pequenos universos de palavras;
- Percepção de imagens 3D;

Hoje, grandes investimentos são feitos nas pesquisas em IA e

os resultados destas começam a ser introduzidos em muitos campos da atividade humana.

### 3.3. DEFINIÇÃO:

Entre as várias definições encontradas na literatura escolhemos, por parecer ser de maior abrangência, a definição seguinte: A Inteligência Artificial é a ciência que se preocupa com a criação de sistemas que possuam características normalmente associadas à inteligência humana, tais como compreensão de linguagem, aprendizagem, raciocínio baseado em processos de indução, dedução, e escolha entre alternativas de solução para um determinado problema (BARR, 81).

Entretanto, o maior problema consiste em quantificar qual deve ser o desempenho destes sistemas, para que sejam considerados inteligentes. Por isso, limites são estabelecidos, para que possa haver um direcionamento das pesquisas. Quando estes são atingidos, novos limites são propostos para a concepção de uma nova "máquina" que reproduza melhor a inteligência humana, com suas características psicológicas, podendo algum destes limites, hoje, até parecer uma utopia.

### 3.4. ESTRUTURA DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL:

A IA já atinge hoje vários campos de atuação. Assim, para se ter uma idéia da sua abrangência desta área, pode-se representá-lo segundo a estrutura apresentada na fig 3.1.

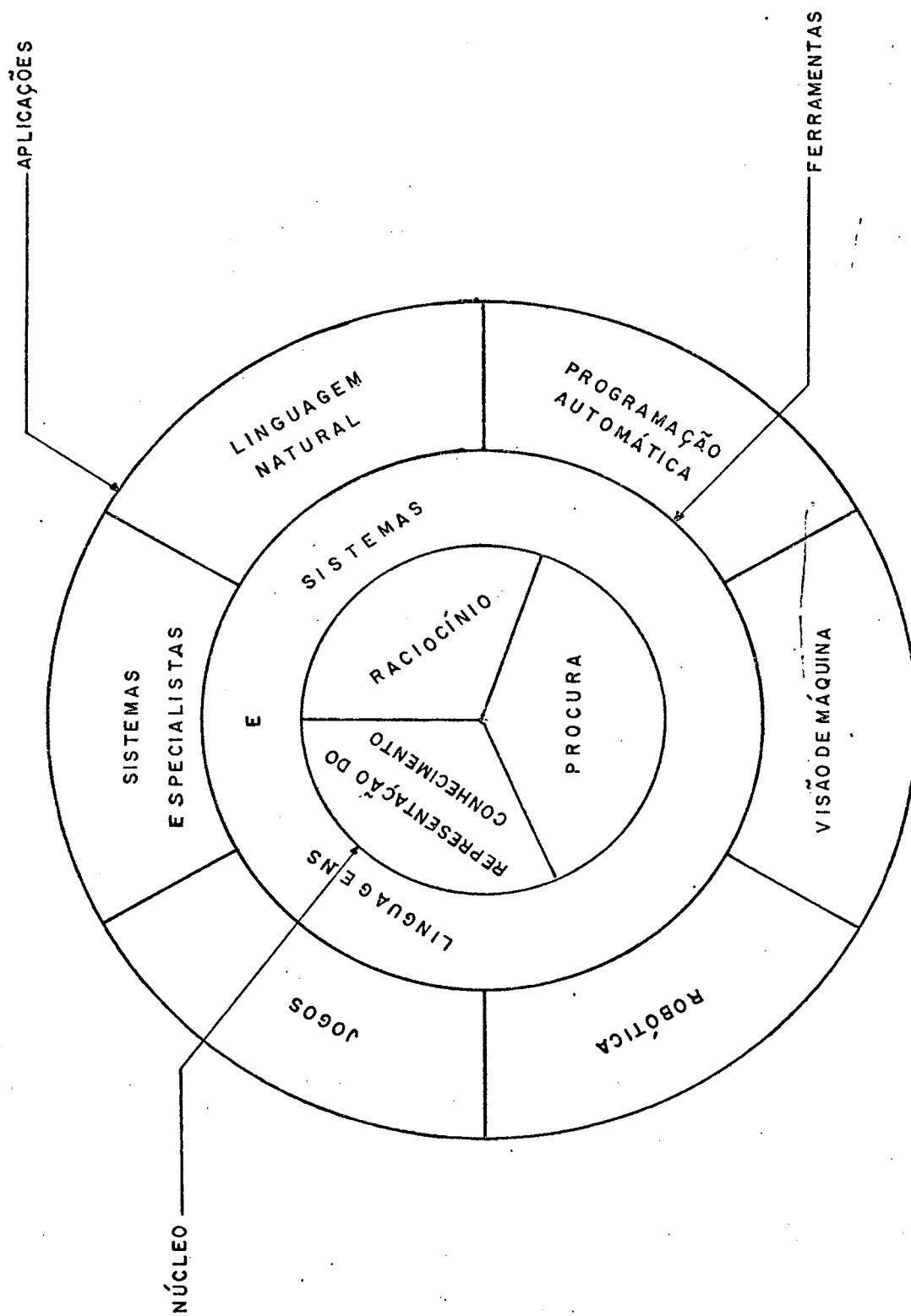


FIG. 3.1 - ESTRUTURA DA IA

### 3.4.1. Núcleo Básico da IA:

Nesta parte são agrupados os estudos sobre os mecanismos fundamentais da inteligência e de técnicas que são comuns as várias aplicações. O núcleo é dividido em três áreas de concentração:

#### .1. Procura:

São as técnicas que visam tornar viável e eficiente a exploração do espaço de estados em busca da solução do problema.

#### .2. Representação do Conhecimento:

São os métodos de codificação da informação para resolver um problema específico, e de sua classificação em vista de uma utilização mais eficiente.

#### .3. Raciocínio e Solução de Problemas:

É o processo de dedução de novas informações a partir dum conjunto de operadores e do estado corrente do sistema.

### 3.4.2. Ferramentas de IA:

São as linguagens que possibilitam a implementação de programas que representam as várias operações necessárias em IA.

### 3.4.3. Aplicações de IA:

#### .1. Jogos:

Esta foi uma das primeiras áreas de atuação da IA, que contribuiu para o entendimento da lógica do raciocínio. Um exemplo bastante conhecido é o desenvolvimento de programas que jogam Xadrez .

#### .2. Sistemas Especialistas:

São programas que usam conhecimento especializado de alto nível sobre um domínio considerado, fornecido por um especialista, e que possuem vários procedimentos de inferência de novos conhecimentos, que permitem chegar até a solução de um problema pertencente a este domínio.

#### .3. Programação Automática:

Consiste na automação de alguma parte do processo de programação.

#### .4. Visão de Máquina:

Consiste no processamento das informações extraídas de uma determinada cena, tornando possível sua interpretação.

#### .5. Linguagem Natural:

É a tarefa de poder entender, interpretar, e gerar sons ou textos, de maneira inteligente, ou seja, comunicar-se em linguagem natural.

## .6. Robótica:

Procura-se desenvolver robos inteligentes que substituam o homem na execução de determinadas tarefas. Na busca de tornar estas máquinas mais eficientes e autônomas possíveis, é necessário dotá-las além de suas características inerentes (movimento, uso de ferramentas, etc.), de outras características tais como visão, compreensão de linguagens naturais, e mecanismos de tomada de decisão.

### 3.5. O PROCESSO DE PROCURA:

Procura é a pesquisa da solução de um problema dentro de um espaço de estados que caracteriza todas as situações possíveis deste problema; um estado é um conjunto de valores que representam completa ou satisfatoriamente uma determinada situação.

Para que a procura se realize, é necessário definir um estado que represente as condições iniciais, um ou mais estados que representem as soluções desejadas, e operadores de passagem entre estes estados.

O estudo da Procura se preocupa principalmente em desenvolver técnicas que tornem o processo de busca da solução do problema mais eficiente.

#### 3.5.1. Estruturação do Espaço de Estados:

A maneira mais simples e mais intuitiva de se representar um



espaço de estados é através de uma estrutura do tipo árvore, onde cada estado é representado por um nó, que é expandido pela aplicação de operadores que geram um conjunto de nós sucessores, que por sua vez podem ser também expandidos.

O espaço de estados pode também ser representado por um grafo, onde operadores aplicadas a um estado, geram caminhos que levam a outros estados .

### 3.5.2. Direção da Procura:

A procura dentro de um espaço de estados pode ser realizada segundo duas direções:

- Para frente ("forward"), partindo dos estados iniciais em direção às soluções;
- Para trás ("backward"), partindo das soluções ou estados finais, em direção aos estados iniciais.

Num processo de diagnóstico, direcionar a procura para frente significa obter uma determinada causa para uma série de sintomas apresentados, enquanto que direcionar a procura para trás significa verificar se determinada causa atende a uma série de condições ou características pré-estabelecidas.

A escolha da direção é função de alguns fatores, como por exemplo:

- a evolução de um número menor de estados conhecidos, para um número maior;

- a evolução na direção em que o fator de ramificação, ou seja, o número de sucessores dos nós da árvore de estados é menor;
- a evolução numa direção em que se possa justificar a resposta, ou o processo de solução.

Por exemplo, quando se tenta provar um teorema, o ponto de partida, ou estado inicial, é geralmente uma série de axiomas matemáticos e teoremas já anteriormente provados, e como estado final, a prova do teorema. A direção de procura mais indicada neste caso é para trás, isto é, pega-se como ponto de partida o teorema que se quer provar, e fundamentado no conhecimento existente, tenta-se provar que ele atende aos axiomas existentes. Se a procura fosse para frente, poderia tornar-se inviável, uma vez que, de cada axioma, derivam um número extremamente grande de resultados.

Agora, se por exemplo, o problema é determinar o resultado de uma integral simbólica. Identifica-se como estado inicial a integral que se quer solucionar, e como estado final, uma expressão na qual não exista o símbolo de integral. A direção mais indicada neste caso é para frente, isto é, partindo do problema proposto, aplica-se uma série de regras de integração até chegar-se ao resultado. É fácil ver que, a procura para trás é inviável porque o número de expressões que podem ser tomados para ponto de partida em busca da solução são praticamente infinitos (RICH,83).

### 3.5.3. Procura Heurística:

A procura da solução de um problema pode ser realizada a partir de uma pesquisa aleatória, ou de uma pesquisa exaustiva no espaço de estados, com o risco de se ter uma explosão combinatória. Diretrizes devem ser usadas para que a procura seja o mais eficiente possível.

Para isto, faz-se uso da pesquisa heurística, que orienta as decisões a partir de heurísticas, como por exemplo, funções de avaliação que indiquem uma solução parcial mais próxima do objetivo.

Regras Heurísticas são aquelas que uma pessoa aprende com sua experiência, profissional ou não, no dia-a-dia, e que geralmente não estão sob domínio público. São elas que realmente caracterizam esta pessoa como perito, ou especialista, em um determinado assunto. A procura heurística é uma técnica que acrescenta eficiência ao processo de procura mas que nem sempre leva à melhor solução. Apesar disto, é bastante utilizada pois na grande maioria dos casos leva a um resultado satisfatório (RICH,83).

#### 3.5.4. Estratégias de Procura:

Na grande maioria das vezes, o espaço de estados de um problema é bastante vasto. Afim de evitar uma busca exaustiva da solução, deve-se fazer uso de estratégias de controle que permitem direcionar o processo de procura para a solução, tornando este processo mais eficiente.

As estratégias de procura são classificadas segundo seus objetivos, e algumas delas são descritas a seguir (WINSTON,84):

.a. Encontrar Algem Caminho para Solução:

.a.1. Procura em Profundidade Primeiro (Depth First Search):

Esta estratégia consiste em desenvolver primeiro os nós sucessores mais recentemente gerados. Em consequência, a partir do primeiro sucessor determina-se seus respectivos sucessores, repetindo-se o processo até encontrar a solução. Caso esta não seja encontrada no caminho percorrido (o qual deve possuir um fim), a procura recomeça num nível imediatamente superior da árvore, em um nó ainda não pesquisado. É uma busca exaustiva da solução.

Este processo pode ser usado se a árvore for pequena e não muito profunda. Caso estas restrições não sejam observadas, o esforço gasto na procura poderá assumir proporções que tornam o processo inviável.

.a.2. Procura em Largura Primeiro (Breadth First Search):

A procura da solução é feita por níveis da árvore, desenvolvendo primeiramente os nós mais anteriormente gerados ou seja, um novo nível de sucessores é gerado somente se a solução não pertence a todos os possíveis nó do nível atual da pesquisa.

Este processo, apesar de poder ser usado em árvores de grande profundidade, não é aconselhável

quando houver um fator de ramificação muito grande.

.a.3. Procura em Profundidade Ordenada (Hill Climbing):

Este é um aperfeiçoamento da estratégia "Procura em Profundidade Primeiro". Dentre os nós mais recentemente gerados é desenvolvido primeiro o nó que, por alguma heurística, é considerado o mais promissor para levar a uma solução do problema. Caso este nó não leve efetivamente a solução, é escolhido o segundo nó mais promissor, e assim por diante.

A. Procura em Profundidade Ordenada é um processo que apresenta bom desempenho quando existe uma maneira de se avaliar a distância do estado atual até a solução e, entre um conjunto de possibilidades, qual a mais promissora.

.a.4. Procura o Melhor Primeiro" (Best First Search):

A estratégia "Procura o Melhor Primeiro" consiste em escolher o nó mais promissor entre todos os nós em aberto (ainda não pesquisados), na árvore de procura.

Os caminhos percorridos por este processo, são geralmente menores dos que os encontrados por outras estratégias, porque o movimento é sempre feito a partir do nó que mais se aproxima da solução.

Da mesma forma que a Procura em Profundidade Ordenada, pode ser usado quando houver uma maneira de se

avaliar a distância de um estado até a uma solução.

.b. Encontrar o Melhor Caminho para a Solução:

.b.1. "Algoritmo do Museu Britânico":

Esta estratégia de encontrar o melhor caminho para a solução de um problema consiste em:

- i - Gerar todos os possíveis caminhos;
- ii - Escolher o melhor.

A sua aplicação só é possível em árvores extremamente pequenas, uma vez que o número de caminhos possíveis numa árvore com profundidade " $p$ " e com " $b$ " sucessores em cada nó é da ordem de  $b^p$  alternativas.

.b.2. Procura " Branch and Bound ":

Para aplicar esta estratégia é necessário que se tenha condições de associar a cada nó uma medida de qualidade que represente o esforço dispendido para se deslocar do nó inicial até o nó em questão, como por exemplo, uma medida de distância percorrida, combustível ou energia gasta. Escolhe-se, então entre todos os nós existentes em aberto, o que apresente a menor medida de esforço.

Este processo pode ser melhorado se for possível

prever (medir) em cada nó o esforço necessário para chegar a solução. Neste caso a heurística que vai indicar o melhor nó para dar prosseguimento a procura, é definida pela expressão:

$$et \text{ (esforço total)} = d \text{ (esforço já dispendido)} + e \text{ (esforço a ser dispendido)}.$$

#### .b.3. Princípio de Programação Dinâmica:

Esta estratégia é um aperfeiçoamento do processo "Branch and Bound" e consiste simplesmente em eliminar todos os caminhos cujos nós terminais em aberto tenham a mesma denominação (isto é, um mesmo nó que foi atingido por vários caminhos diferentes), permanecendo apenas o caminho que possuir a menor medida de esforço.

#### .b.4. Algoritmo A\*:

É uma composição do processo "Branch and Bound" com estimação do esforço restante e a estratégia do Princípio da Programação Dinâmica. Os resultados encontrados com esta estratégia são excelentes.

### 3.6. REPRESENTAÇÃO DO CONHECIMENTO:

A seguir serão apresentadas algumas técnicas de estruturação e formalização do conhecimento em sistemas de IA.

### 3.6.1. Estruturação do Conhecimento:

Existem várias maneiras de estruturar o conhecimento dentro de uma aplicação de IA. As principais estruturas de representação são:

- As Regras de Produção;
- As Redes Semânticas;
- " Frames".

#### .a. Regras de Produção:

Os especialistas tendem a expressar seu conhecimento através de um conjunto de relações do tipo situação-ação. Estas relações são denominadas regras e são uma maneira mais natural de expressar o conhecimento.

A representação do conhecimento em regras, consiste em estruturá-lo em uma série de relações SE - ENTÃO. De uma maneira geral pode-se dizer que "uma regra consiste de um lado esquerdo que determina a aplicabilidade e de um lado direito que descreve a ação a ser executada se a regra for aplicada" (RICH,83).

Ex.:

SE atuou relé de proteção (lado esquerdo)

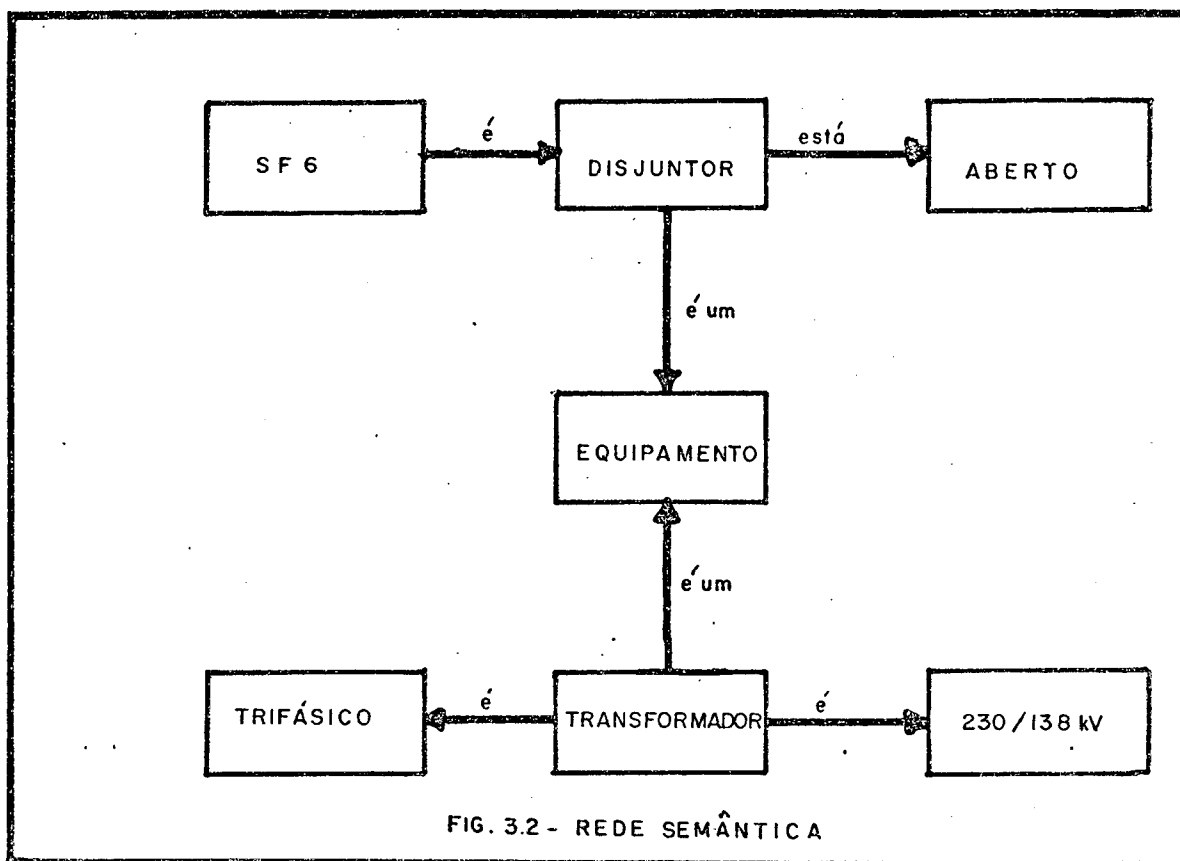
ENTÃO (abrir disjuntor AND (lado direito)  
emitir alarme .)



O maior problema com a utilização de regras de produção é a granulação do conhecimento. Com isto, a determinação de quais regras são sensibilizadas em um dado estado do sistema só é possível após o teste sobre todas as regras, o que consome muito tempo. Algumas soluções foram propostas como a estruturação das regras em taxonomia (WOOD,87) ou a sua compilação (DUFRESNE,84).

.b. Redes Semânticas:

A estruturação do conhecimento por redes semânticas é bastante simples. Consiste num conjunto de nós, que representam objetos, conceitos ou situações de aplicação, conectados uns aos outros por um conjunto de arcos que representam as relações semânticas entre estes nós. As redes semânticas oferecem a possibilidade de inferência por herança, ou seja, as características atribuídas a um nível da rede, são automaticamente assumidas pelos níveis inferiores. Um exemplo é apresentado na fig. 3.2.



A leitura desta rede é feita da seguinte maneira:

EQUIPAMENTO é um DISJUNTOR

DISJUNTOR é SF6

DISJUNTOR está ABERTO

EQUIPAMENTO é um TRANSFORMADOR

TRANSFORMADOR é 230/138kV

TRANSFORMADOR é TRIFÁSICO

#### .c. "Frames":

Regras e Redes Semânticas representam muito bem experiências conhecidas, bem como servem perfeitamente para inferir conclusões e analisar estas experiências. Mas apresentam grande dificuldade de operação quando solicitadas para analisar uma situação sobre a qual existem poucas e incompletas informações ou para descrever entidades com alto grau de complexidade. A estrutura denominada "frame" foi

desenvolvida para atender a estas necessidades (RICH, 83), (WATERMAN, 86).

Um objeto ou uma situação é descrita internamente num "frame" através de "slots". A cada "slot" são associadas características ou procedimentos de um objeto ou situação, que podem, por sua vez, estarem detalhados em outros "frames", formando assim uma estrutura de ascendência e descendência entre "frames" (hereditariedade).

Frames são utilizados principalmente em aplicações de grande complexidade, como interpretação de linguagem natural e interpretação da visão.

### 3.6.2. Formalização do Conhecimento:

Para poder ser manipulado, é preciso que o conhecimento seja representado de uma maneira formal. A maneira mais fácil e mais utilizada é a Lógica.

#### .a. Lógica Proposicional:

A lógica mais simples é a Lógica Proposicional (ou Lógica Sentencial), onde as expressões lógicas são predicados (funções de Valor Verdadeiro ou Falso) de aridade  $\emptyset$  (sem variáveis) chamados proposições. Os primeiros estudos sobre lógica sentencial remontam ao século passado e seus principais estudiosos foram Boole e DeMorgan.

A sua sintaxe é bastante simples, consistindo apenas de sentenças interligadas pelos conectores AND, OR, NOT,

IMPLICA, que permitem realizar diversas operações combinatórias.

Ex.: Seja o fato:

O equipamento DJ152 é um DISJUNTOR.

Pode ser representado como:

equipamento (DJ 152,DISJUNTOR).

Ex.: Seja a regra:

SE: relé 50/51A do bay 5 OPEROU E

a chave 43 do bay 5 está NORMAL

ENTÃO: o disjuntor 52 do bay 5 ABRIU

Pode ser representado como:

relé (50/51A,5,OPEROU) AND chave (43,5,NORMAL)

----> disjuntor (52,5,ABRIU)

#### .b. Lógica dos Predicados:

A representação por lógica proposicional é insuficiente quando se deseja representar uma classe de objetos e relações entre eles. A Lógica dos Predicados atende a estas necessidades.

A lógica de predicados possui uma sintaxe mais complexa do que a proposicional. É composta por sentenças que, além das propriedades da Lógica Sentencial, permitem, como argumento dos predicados, o uso de variáveis, funções matemáticas e expressões como : "existe...", "para todo...".

Ex.: Seja o fato:

" Todo disjuntor tem prefixo DJ."

Pode ser representado como:

"disjuntor (X)" -----> "prefixo (X,DJ)."

Ex.: Seja a regra:

"Se atuou a proteção de um determinado bay, e a mesma está transferida, então deve-se abrir o disjuntor de transferência."

Pode ser representado como:

"atuou\_proteção (X)" AND "transferida\_proteção (X)" -----> "abrir (DJ-TR)."

### 3.7. RACIOCÍNIO E SOLUÇÃO DE PROBLEMAS:

#### 3.7.1. O Princípio da Resolução:

A resolução de um problema representado em lógica é realizado por provas por refutação (ou contradição). Desta forma, para provar que uma determinada questão é verdadeira, tenta-se provar que a sua negação produz uma contradição com todas as declarações .

Para se aplicar o algoritmo de resolução, todas as declarações devem ser convertidas para uma forma denominada de Cláusulas ou Forma Normal Conjuntiva (FNC).

#### .a. Resolução em Lógica Sentencial:

A seguir, é apresentado de forma simplificada o algoritmo de resolução para lógica sentencial.

- .1. Converter todas as declarações para a forma de cláusulas (FNC) aplicando basicamente as relações:

$A \text{ ----- } B \text{ =====> (NOT A) OR B}$

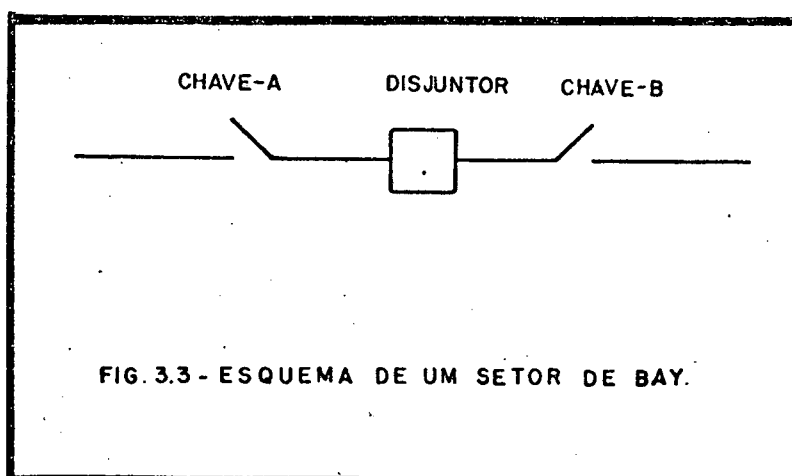
$\text{NOT}(\text{NOT A}) \text{ =====> A}$

$\text{NOT}(A \text{ AND } B) \text{ =====> (NOT A) OR (NOT B)}$

$\text{NOT}(A \text{ OR } B) \text{ =====> (NOT A) AND (NOT B)}$

- .2. Negar a questão e também converte-la para a FNC;
- .3. Comparar as cláusulas e eliminar as que se contradizem, iniciando pela cláusula questão;
- .4. Se o resultado for uma cláusula vazia (NIL), então a contradição foi determinada, senão continuar até que não seja mais possível.

O seguinte exemplo ilustra este algoritmo. Na fig. 3.3 é mostrado um setor de um bay, composto de um disjuntor e de suas respectivas chaves isoladoras.



### Declarações:

- 1 - a CHAVE-A está aberta;
- 2 - a CHAVE-B está aberta;
- 3 - o DISJUNTOR está aberto.
- 4 - SE : o DISJUNTOR estiver aberto E  
a CHAVE-A estiver aberta  
ENTÃO : é possível fechar a CHAVE-A.
- 5 - SE : o DISJUNTOR estiver aberto E  
a CHAVE-B estiver aberta  
ENTÃO : é possível fechar a CHAVE-B.

### Questão:

- 6 - é possível fechar a CHAVE-A ?

### Formalizando em Lógica Sentencial:

- 1 - aberto (CHAVE-A)
- 2 - aberto (CHAVE-B)
- 3 - aberto (DISJUNTOR)
- 4 - aberto (DISJUNTOR) AND aberto (CHAVE-A)  
-----> pode\_fechar (CHAVE-A).
- 5 - aberto (DISJUNTOR) AND aberto (CHAVE-B)  
-----> pode\_fechar (CHAVE-B).
- 6 - pode\_fechar (CHAVE-A)

### Passando para FNC:

- 1 - aberto (CHAVE-A)
- 2 - aberto (CHAVE-B)

- 3 - aberto (DISJUNTOR)
- 4 - NOT(aberto(DISJUNTOR)) OU NOT(aberto(CHAVE-A))  
OU pode\_fechar (CHAVE-A)
- 5 - NOT(aberto(DISJUNTOR)) OU NOT(aberto(CHAVE-B))  
OU pode\_fechar (CHAVE-B)
- 6 - NOT(pode\_fechar (CHAVE-A)).

Aplicando o processo de resolução, temos:

COMPARANDO

RESULTADO (R)

6 com 4 --- NOT(aberto(DISJUNTOR)) OU NOT(aberto(CHAVE-A)) (R1)  
 R1 com 1 ----- NOT(aberto(DISJUNTOR)) (R2)  
 R2 com 3 ----- nil

Logo a CHAVE-A pode ser fechada.

#### .b. Resolução em Lógica dos Predicados:

Em lógica dos predicados, o processo de comparação das cláusulas é mais complexo do que na lógica proposicional, já que os valores assumidos pelas variáveis devem ser considerados. Desta consideração, derivam dois conceitos importantes: unificação e instanciamento.

De uma forma simplificada, pode-se dizer que uma variável está instanciada quando a ela é atribuído um valor. Alguns autores classificam estas variáveis de livres ou ocupadas.

Diz-se que duas variáveis estão unificadas quando elas representam o mesmo valor.



Os exemplos seguintes ilustram os conceitos anteriores:

Exemplo 1: Combinar

equipamento(X,Y) com proteção(distância,Z)

Não é possível pois os predicados são diferentes (equipamento e proteção).

Exemplo 2: Combinar

equipamento(X,Y) com equipamento(disjuntor,Z)

É possível porque:

- são identificadas pelo mesmo predicado e possuem o mesmo número de argumentos.
- X pode ser instanciado com disjuntor;
- Y pode ser unificado com Z, isto é, um valor que Y venha a assumir, Z também assumirá e vice-versa.

O algoritmo de resolução para lógica de primeira ordem é semelhante ao usado para lógica proposicional, diferindo apenas no fato de que são as condições de Unificação e Instanciamento das variáveis que devem ser verificadas.

Esta é apenas uma noção básica deste poderoso processo de solução de problemas em lógica. Aplicações deste algoritmo foram desenvolvidas, tais como o Método de Resolução Linear e o Método

da Eliminação de Modelos, que serviram de suporte para o desenvolvimento da linguagem PROLOG.

Um detalhamento mais aprofundado das técnicas de resolução pode ser visto em (CASANOVA,86), (WINSTON,84), (RICH,83).

### 3.7.2. Fator de Confiança:

O Fator de Confiança (FC) permite atribuir um grau de certeza aos fatos e regras que descrevem determinado domínio do conhecimento.

Ao Fator de Confiança é atribuído um valor entre  $\emptyset$  e 1, sendo que o valor  $\emptyset$  representa um conhecimento totalmente falso e o valor 1 representa um conhecimento absolutamente verdadeiro.

A resposta de um problema, obtida através de um processo de procura sobre fatos e regras que utilizam Fator de Confiança, possui também um grau de certeza na resposta é determinado em função dos Fatores de Confiança encontrados no caminho percorrido até obter esta resposta (WEISS,85), (WINSTON,84).

### 3.8. FERRAMENTAS DE IA:

As linguagens de programação de computadores existentes atualmente podem ser divididas em dois grandes grupos:

- Procedurais;
- Declarativas.

A evolução das linguagens é direcionada no sentido de cada vez mais informar o computador de "o que fazer" ao invés de "como fazer". Desta maneira, as linguagens vão se tornando cada

vez menos procedurais e cada vez mais declarativas.

### 3.8.1. Linguagens Procedurais ou Imperativas:

São aquelas em que é necessário fornecer um algoritmo detalhado para que um problema possa ser resolvido. É preciso descrever passo-a-passo todas as etapas do fluxo de controle, com todos os possíveis caminhos alternativos e caminhos de erro. Devido a esta necessidade de detalhamento dos programas, estes podem tornar-se excessivamente grandes e de difícil compreensão. Além disto, estas linguagens apresentam grandes dificuldades para implementar programas que infiram soluções não previsíveis. Estes são fatores que elevam substancialmete o custo final do software; por exemplo, FORTRAN, PASCAL, MODULA, são linguagens consideradas procedurais.

### 3.8.2. Linguagens Declarativas:

São aquelas em que a programação é feita através da descrição do problema. Visam a construção de programas mais simples e de fácil entendimento, uma vez que não existe a preocupação primordial em relação ao fluxo de controle do programa.

Alguns exemplos de linguagens declarativas são LISP, PROLOG, FP, e outras.

Apesar destas linguagens serem consideradas declarativas, e de fato serem as que atualmente mais se aproximam deste conceito,

ainda não o são completamente, pois muitas vezes surge a necessidade de descrever alguns problemas segundo algoritmos procedurais. A seguir são apresentados alguns exemplos de linguagens declarativas.

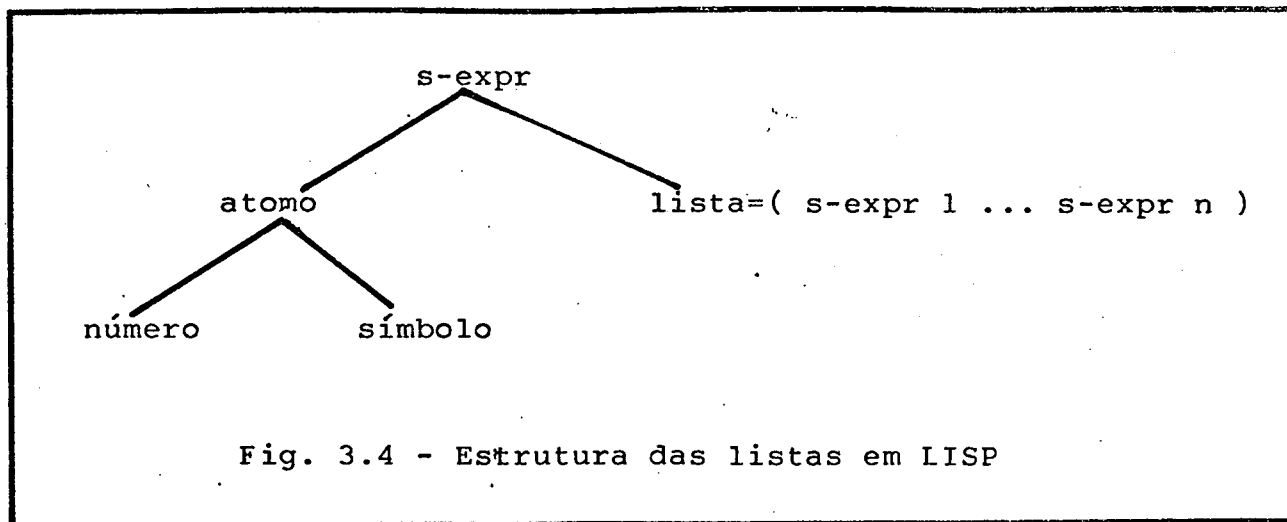
.a. A Linguagem LISP:

O LISP (LIST Processing) é uma das mais antigas linguagens declarativas, tendo sido utilizada a partir de 1960.

A expressão elementar manipulada em LISP é a expressão simbólica "s-expr" que pode ser:

- um átomo, representando um número ou uma variável;
- uma lista formada por um conjunto de s-expr entre parênteses.

Vê-se que a definição de lista é recursiva e é mostrada na fig. 3.4.



Toda s-expr LISP tem um valor, que cabe ao

interpretador determinar qual é.

Num programa em LISP, não só os dados são estruturados em listas, mas também todo o programa. Uma vez que o LISP foi desenvolvido a partir de um dispositivo denominado "expressão Lambda", na qual uma função pode ser manipulada como um dado, permite também que funções sejam definidas a partir de listas. O LISP possui como único mecanismo de controle a recursividade (EISENBACH,85).

.b. A linguagem PROLOG:

A programação em lógica iniciou-se na década de 50 com os esforços de tornar possível a prova de teoremas matemáticos através de computadores. A partir destes esforços, avanços significativos foram feitos na década de 60, culminando em 1972 com o desenvolvimento do algoritmo de resolução linear (EISENBACH,85)(CASANOVA,86), que permitiu a construção do primeiro interpretador PROLOG.

As principais características do PROLOG (PROgramming in LOGic) são as seguintes (CASANOVA,86),(COHEN,85):

- .1. É orientada para o processamento simbólico;
- .2. Representa uma implementação da lógica como linguagem computacional;
- .3. Apresenta uma semântica declarativa inerente a lógica em adição a semântica operacional usual das linguagens de programação tradicionais ;

- .4. Suporta definições recursivas para descrição de processos e problemas, dispensando os mecanismos tradicionais de controle das linguagens procedurais;
- .5. Permite a definição de programas invertíveis, ou seja, programas que não distinguem entre argumentos de entrada e de saída.
- .6. Permite a obtenção de respostas alternativas devido a estrutura de controle denominada backtracking;
- .7. Permite descrever a especificação e a codificação de programas numa mesma linguagem;
- .8. Representa programas e dados através do mesmo formalismo (cláusulas).
- .9. Tem alta modularidade, visto que cada cláusula é um módulo em relação as demais;

### 3.9. APLICAÇÕES DE IA: SISTEMAS ESPECIALISTAS:

#### 3.9.1. Algumas Definições:

Um Sistema Especialista é um programa capaz de tratar um determinado problema (num domínio específico), imitando o comportamento de um Especialista humano neste domínio. Entende-se por Especialista, uma pessoa que detém conhecimentos e experiências numa área determinada.

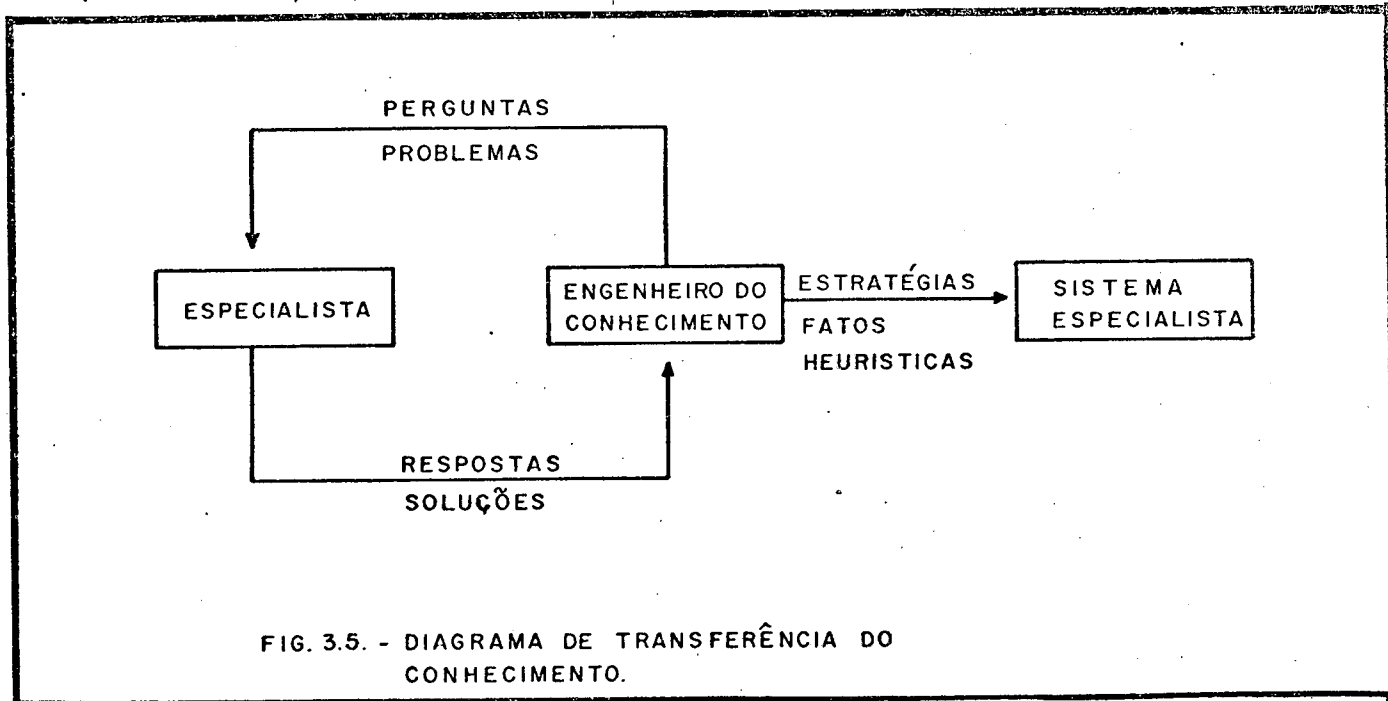
O conhecimento que um Especialista detem pode ser de dois

tipos:

- o conhecimento que é de domínio público;
- o conhecimento que ele detem devido a sua vivência profissional e pessoal, que o leva a fazer suposições e a usar do bom senso; tal conhecimento é denominado de conhecimento heurístico.

Para realizar um Sistema Especialista é necessário transferir o conhecimento do Especialista para uma Base de Conhecimentos. A transformação deste conhecimento para uma representação formal, capaz de ser manipulada, é feita pelo Engenheiro de Conhecimento.

O relacionamento entre o Especialista e o Engenheiro de Conhecimento é mostrado pelo diagrama apresentado na figura 3.5 (WATTERMANN, 86).



### 3.9.2. Sistemas de Produção:

Afim de facilitar a estruturação e representação do

conhecimento, bem como agilizar o processo de procura, a maioria dos programas de IA, são estruturados de uma forma denominada Sistemas de Produção. Um Sistema de Produção consiste de:

- .a. Um conjunto de regras, com indicações de sua aplicabilidade e de suas ações correspondentes;
- .b. Uma base de dados ;
- .c. Uma estratégia de controle que especifica a ordem na qual as regras são usadas e como resolver conflitos quando mais de uma regra puder ser aplicada.

Novas regras podem ser adicionadas a um Sistema de Produção sem alteração no resto do programa, porque o acesso as regras é associativo, isto é, não há necessidade de explicitar qual regra será utilizada, e a sua ativação é não determinística, ou seja, não há necessidade de explicitar a ordem em que as regras serão aplicadas. Esta característica é muito importante, pois assim um sistema pode constantemente ser aperfeiçoado.

### 3.9.3. Categorias de Aplicação:

Em função de sua aplicação final, um Sistema Especialista pode ser classificado em uma (ou mais de uma) das categorias abaixo relacionadas (WATTERMANN, 86):

- Interpretação, que consiste em inferir a descrição de situações a partir de sensores;
- Predição, que consiste em inferir possíveis consequências



de determinadas situações;

- Diagnóstico, que consiste em inferir a causa de mal funcionamento a partir de observações;
- Planejamento, que consiste em projetar ações;
- Monitoração, que consiste em comparar observações a valores esperados;
- Depuração, que consiste em determinar soluções para as causas de mal funcionamento;
- Reparo, que consiste em executar planos para administrar a aplicação das soluções obtidas pela depuração;
- Controle, que consistem em comandar o comportamento de sistemas;
- Instrução, que consiste em transmitir conhecimentos, tendo ainda a capacidade de realizar testes, avaliar resultados, repetir instrução, etc.

#### 3.9.4. Quando usar um Sistema Especialista?

Antes de se concluir a respeito de quando usar um Sistema Especialista, deve-se analisar o porque de seu uso (WATERMAN, 86).

Existem uma série de razões que podem justificar este porque:

- O caráter perecível do conhecimento do Especialista;
- A dificuldade de transferência do conhecimento e da

experiência de um Especialista, resultando em longos períodos de formação e altos custos;

- O elevado custo de manutenção de especialistas e o seu pequeno número;
- A influência das pressões físicas e psicológicas sobre as decisões tomadas pelo especialista humano;
- A necessidade de uniformização de decisões e resultados.

Muitas são as razões que devem ser levadas em conta para se verificar a possibilidade de se usar um Sistema Especialista. De uma maneira geral, pode-se dizer que a sua aplicação é possível e justificável quando:

- Existe um Especialista no assunto;
- O ambiente é agressivo ao ser humano, seja do ponto de vista física ou psicológica;
- Tem-se que executar tarefas que exijam a manipulação de símbolos e regras heurísticas;
- Os limites de aplicação do problema estão bem definidos;
- O seu uso trará melhorias do ponto de vista do tempo de resposta, da confiabilidade e da exatidão dos resultados.

Um estudo mais aprofundado sobre estas considerações pode ser obtido em (WATTERMANN,86).

### 3.9.5. Estrutura de um Sistema Especialista:

A estrutura básica de um Sistema Especialista é apresentado na figura 3.6.

No núcleo do Sistema está implementada a sua perícia. Ele é composto de dois módulos fundamentais:

- A Base de Conhecimento que possui armazenado o conhecimento do especialista;
- O Motor de Inferência que contém as técnicas de procura da solução de problemas, de aplicação do conhecimento, de tratamento de incertezas e de tratamento de conflitos e de justificativas.

O módulo Interface com o Usuário permite, a quem utiliza o sistema, dar entrada ao problema, fornecer informações adicionais ao sistema, obter as respostas e eventualmente as justificativas sobre seu processo de raciocínio.

O módulo Aquisição de Conhecimento ou Interface com o Especialista permite o acesso à Base de Conhecimentos para que esta possa sofrer modificações ou ampliações.

### 3.9.6. Construção de um Sistema Especialista:

Não existe uma metodologia estabelecida para a construção de um Sistema Especialista; entretanto, a filosofia de uma abordagem por refinamentos sucessivos está presente ao longo do desenvolvimento dos sistemas especialistas.

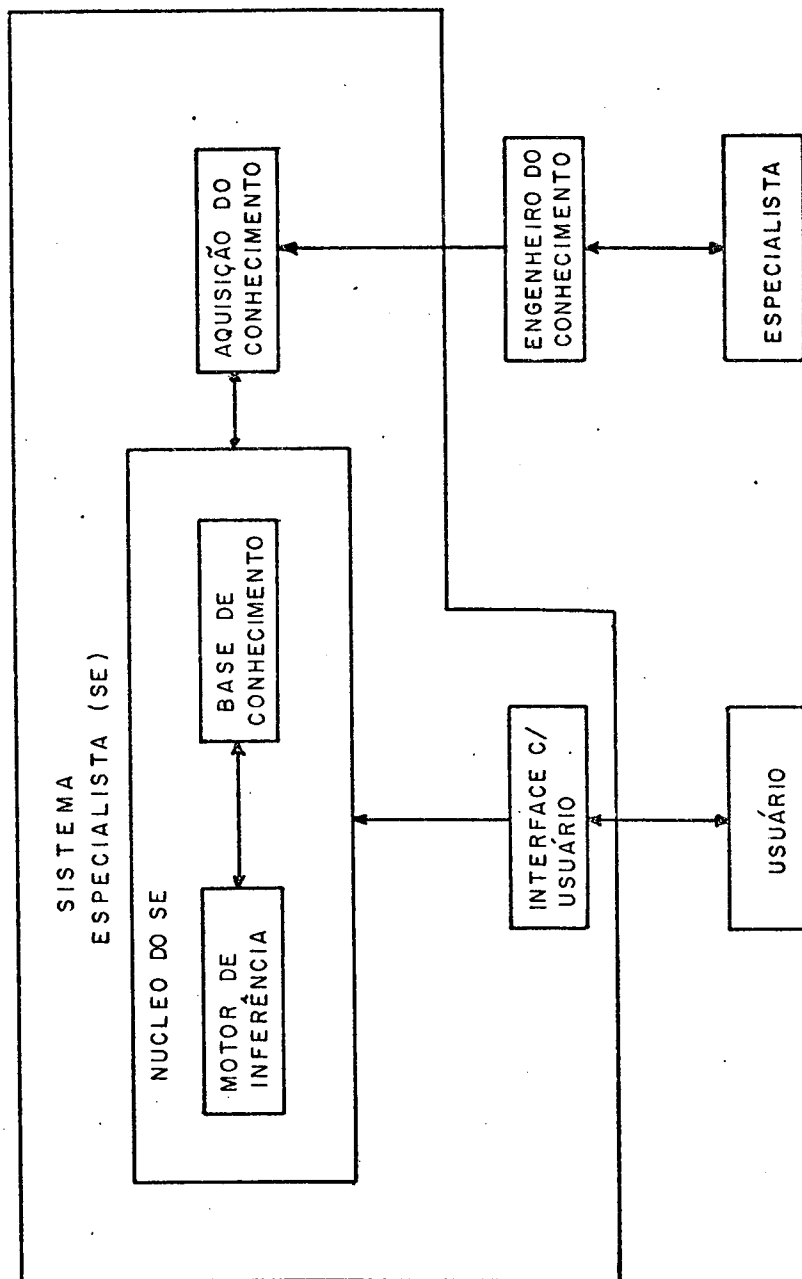


FIG. 3.6 - ESTRUTURA BÁSICA DE UM SISTEMA ESPECIALISTA.

É possível distinguir cinco fases neste desenvolvimento:

.a. Identificação:

O engenheiro do conhecimento e o perito determinam juntos quais as características mais importantes do problema, destacando a definição do problema propriamente dito, as fontes de consulta, os recursos a serem utilizados, etc.;

.b. Conceitualização:

O engenheiro do conhecimento e o perito definem conjuntamente conceitos, relações, mecanismos de controle, restrições que permitirão descrever o conhecimento e o nível de detalhes no qual este será representado. Nesta fase, o perito transmite a sua experiência e o seu conhecimento para o engenheiro do conhecimento;

.c. Formalização:

Esta é uma fase onde atua exclusivamente o engenheiro do conhecimento. Os conceitos e relações definidos na fase anterior são estruturados de uma maneira formal, de acordo com o tipo de representação escolhido;

.d. Implementação:

O conhecimento já formalizado é organizado numa Base de Conhecimentos, segundo o tipo de representação escolhido e

implementado numa linguagem apropriada; hoje já existem linguagens e ferramentas orientadas à implementação de Sistemas Especialistas, tais como OPS5, OPS83, ROSIE, EXSYS, EMYCIN e outras;

.e. Testes:

Nesta fase, é feita uma avaliação do desempenho do programa no que diz respeito a qualidade da resposta, integração, tempos, e até mesmo capacidade do programa de substituir o especialista. Em função disto, pode-se ter que revisar fases anteriores, reformulando-se conceitos, refinando-se regras e revisando-se o fluxo de controle.

3.9.7. Escolha da Ferramenta para Construção um Sistema Especialista:

Existem basicamente dois tipos de ferramentas que possibilitam o desenvolvimento de um Sistema Especialista:

- .a. Linguagens de Programação (Ex.: LISP, PROLOG) - Elas oferecem uma grande flexibilidade no projeto do Sistema Especialista, mas tudo o que diz respeito a sua estrutura funcional tem que ser construído, pois existe a necessidade de se projetar a base de conhecimento, o motor de inferência e as interfaces com usuário e engenheiro de conhecimento.
- .b. Linguagem de Engenharia do Conhecimento (Ex.: ROSIE, EMYCIN, EXSYS) - São menos flexíveis que as linguagens de programação, pois a estrutura da base de

conhecimentos, o motor de inferência e as interfaces com usuário e engenheiro do conhecimento já são definidas. Todo o trabalho consiste em introduzir o conhecimento propriamente dito.

Desta maneira, o desenvolvimento é mais fácil e mais rápido que com o uso de uma linguagem de programação, embora o resultado final seja geralmente de menor qualidade.

#### 3.9.8. Diferenças entre Sistemas Especialistas e Sistemas Convencionais.

Algumas das diferenças que os Sistemas Especialistas apresentam em relação aos Sistemas Convencionais de processamento são apresentadas a seguir.

Os Sistemas Convencionais basicamente utilizam estruturas de dados e aplicam algoritmos bem definidos repetitivamente enquanto os Sistemas Especialistas utilizam conhecimentos descritos por representação simbólica e aplicam regras heurísticas através de processos dedutivos.

Uma vez que o controle é separado do conhecimento, os Sistemas Especialistas permitem que conhecimentos possam ser retirados, incluídos ou modificados sem que isto cause qualquer alteração na estrutura do programa, o que dificilmente pode ocorrer num Sistema Convencional.

### 3.9.9. Limitações de um Sistema Especialista:

Os sistemas especialistas possuem atualmente algumas limitações que tenderão a desaparecer com o tempo, graças aos progressos obtidos na área de Inteligência Artificial:

- Os Sistemas Especialistas possuem limites de atuação, e falham quando solicitados para executarem tarefas diferentes daquelas para as quais eles foram projetados;
- Não possuem senso comum, isto é, o conhecimento que uma pessoa adquire ao longo de sua existência sobre o universo que a rodeia; o conhecimento de um Sistema Especialista é limitado a sua área de atuação;
- Eles têm capacidade muito limitada de criar novos conhecimentos;
- Não existe generalização na forma de representar o conhecimento em Sistemas Especialistas, o que exige a presença de Engenheiros do Conhecimento para cada sistema.

### 3.10. CONCLUSÃO:

Neste capítulo foram apresentados conceitos básicos sobre Inteligência Artificial, destacando em particular o processo de procura e representação do conhecimento, os princípios de resolução e as características gerais requeridas pelos Sistemas Especialistas. Estes conceitos servirão de base teórica para os próximos capítulos, nos quais serão apresentados a especificação e o projeto de um protótipo de Sistema Especialista para Apoio à Operação de Subestações de Alta Tensão.



## CAPÍTULO 4

### CARACTERÍSTICAS GERAIS DE UM SISTEMA ESPECIALISTA PARA AUXÍLIO A OPERAÇÃO DE SUBESTAÇÕES

#### 4.1. INTRODUÇÃO:

No primeiro capítulo, os Sistemas de Controle das Subestações foram brevemente analisados sob o ponto de vista das características de suas funções, de sua evolução histórica e das tendências atuais de desenvolvimento em direção a sua total automatização.

Este estudo mostrou que algumas funções de caráter decisório ainda não estão sendo completamente automatizadas e entre elas podemos citar:

- Atendimento de Contingências;
- Tratamento de alarmes;
- Diagnóstico de Defeitos.

No presente capítulo, será apresentada uma proposta de automatização destas funções que levará à Especificação, ao Projeto e à Implementação de um Sistema Especialista que auxiliará o operador da subestação a desempenhar suas tarefas.

#### 4.2. CONSIDERAÇÕES SOBRE A COMPLEXIDADE DAS FUNÇÕES DO OPERADOR:

Um conjunto de fatores relacionados com o tamanho e

importância de uma subestação dentro de um sistema elétrico influenciam e devem ser levados em conta pelo operador na tomada de decisões, em particular no que diz respeito:

- ao aumento da complexidade do respectivo Sistema de Controle e em consequência ao aumento da quantidade de equipamentos sujeitos a defeitos;
- ao aumento da quantidade de alarmes de supervisão;
- aos eventuais desligamentos na subestação que afetarão mais intensamente todo o sistema elétrico;
- à restrição de tempo no processo de restabelecimento ou reparo de defeitos, fixada a partir do alcance dos prejuízos causados por um desligamento.

#### 4.3. FUNÇÕES DO OPERADOR:

Como visto anteriormente, são basicamente três as funções do operador, no que diz respeito à operação da Subestação em condições anormais:

##### .1. Atendimento a Contingências:

Esta função consiste em desencadear uma seqüência de operações em função da ocorrência de uma contingência, como por exemplo, desligamento de linhas e/ou transformadores. Em subestações com muitas linhas e transformadores, o número de combinações de eventos é bastante grande, sendo que para cada uma é necessário prever-se uma seqüência operacional.

A implementação destes procedimentos pode ser uma tarefa bastante demorada; além disto, a utilização destes deve ser bastante criteriosa, para que as seqüências sejam precisamente obedecidas.

## .2. Tratamento de Alarmes:

Afim de auxiliar a detecção e a localização da causa de defeitos, são instalados, nas subestações, alarmes que individualmente sinalizam eventos isolados, tais como a abertura de um determinado disjuntor ou a operação de uma determinada proteção.

Nas grandes instalações, o número de pontos de alarmes chega facilmente a ordem de algumas centenas, sendo possível o acionamento de vários alarmes por uma única condição de defeito. Neste caso, dois problemas imediatos surgem para o operador:

- Determinar se existe uma ou mais causas comuns entre alguns dos alarmes acionados;
- Determinar qual deve ser a prioridade de atendimento dos mesmos.

Num exemplo bastante simplificado, este processo pode ser visualizado.

Supondo que tenham atuado os seguintes alarmes:

1. Abriu o disjuntor de AT do Transformador T1.

2. Abriu o disjuntor de BT do Transformados T1.

3. Operou o relé de bloqueio (86) do Transformador T1.

4. Operou o relé Buchholz (63) do Transformador T1.

Estes quatro alarmes tem uma causa comum que é a formação de gases no óleo do transformador, detetada pelo relé Buchholz. Uma vez operado, o relé Buchholz atua sobre o relé de bloqueio que por sua vez desliga os disjuntores de AT e BT do Transformador. Obviamente, a primeira providência é atender ao alarme no. 4, ou seja, corrigir a causa da formação de gases. Uma vez isto feito, deve-se desbloquear o relé 86 para depois fechar os disjuntores de AT e BT respectivamente.

Naturalmente, determinar causas e prioridades de alarmes nem sempre é uma resposta fácil como a do exemplo acima, uma vez que numa grande instalação pode haver a atuação simultânea de dezenas de alarmes.

Como na maioria dos casos, a atuação de alarmes está associada ao desligamento de um ou mais bays (linhas e/ou transformadores), é de vital importância que as respostas às questões anteriormente citadas sejam obtidas o mais rápido possível, para que os tempos de desligamentos sejam diminuídos ao mínimo e conseqüentemente sejam minimizados os prejuízos que fatalmente estes desligamentos trarão ao Sistema Elétrico.

### .3. Diagnóstico de Defeitos:

Como visto anteriormente, a medida que cresce o porte de uma subestação, cresce também a sua complexidade e a quantidade de equipamentos instalados, tais como, transformadores, disjuntores, chaves seccionadoras, relés de proteção e dispositivos de medição, supervisão e controle.

Como a maioria destes equipamentos é por sua vez composta de dezenas de componentes, é fácil ver que existe uma gama muito grande de pontos susceptíveis de apresentarem defeito, não sendo todos eles sinalizáveis por alarmes.

A busca de um elemento defeituoso se torna então um trabalho árduo, exigindo muita vezes a consulta de manuais, diagramas de projeto e até mesmo verificações "in loco".

Da mesma maneira que no caso de Tratamento de Alarmes, se a estes defeitos estiver associada uma condição de desligamento, é necessário que as suas causas sejam o mais rápido possível detectadas para que as condições normais de operação do sistema sejam restabelecidas.

### 4.4. JUSTIFICATIVAS DA UTILIZAÇÃO DE UM SISTEMA ESPECIALISTA:

Do exposto anteriormente, fica evidente que, a medida que cresce a complexidade do Sistema de Controle da Subestação (como consequência do aumento do porte e importância da mesma), torna-se necessário implementar funções automatizadas que auxiliem o operador no desempenho das funções citadas.

A utilização de um Sistema Especialista para estas funções pode ser justificada pelos seguintes fatos:

- É um processo automatizado de auxílio;
- O atendimento de contingências, indicando seqüências operacionais a serem executadas necessita um perfeito conhecimento da situação da subestação em relação ao sistema elétrico como um todo, isto é, características das demais subestações, condições de estabilidade, etc.
- A análise de alarmes, além dos requisitos acima descritos para procura de defeitos, necessita de um grande número de informações e de conhecimentos sobre o sistema elétrico da subestação em geral, para determinar as prioridades de atendimento;
- A procura de defeitos é tanto mais rápida quanto maior for o conhecimento das características de projeto, principalmente no que diz respeito a detalhes construtivos de equipamentos e filosofias de controle;

Desta maneira, estas funções exigem a presença de um especialista (ou vários) para executá-las, ou seja, são necessárias as perícias:

- do projetista da instalação para localização de defeitos e tratamento de alarmes;
- de um engenheiro de estudos do sistema elétrico para o atendimento das contingências;

- de um operador que, com sua experiência, conhece os procedimentos (heurísticas) que permitem que o processo seja o mais ágil possível.

A utilização de um sistema especialista para as funções citadas poderá trazer as seguintes vantagens:

- Aumento na rapidez na solução de um problema;
- Diminuição do grau de incerteza numa decisão;
- Uniformidade das soluções;
- Concentração no Sistema Especialista de todas as informações da subestação, no que diz respeito as suas características de projetos, de operação e de seus equipamentos;
- Diminuição da influência de eventuais pressões psicológicas sobre o operador na tomada de decisões.

#### 4.5. CARACTERÍSTICAS DE UM SISTEMA ESPECIALISTA PARA APOIO A OPERAÇÃO DE SUBESTAÇÕES:

Para que um Sistema Especialista tenha reais condições de prestar auxílio ao operador da subestação, deve apresentar algumas características, relacionadas a:

##### 4.5.1. Sua Instalação:

O Sistema Especialista poderá funcionar de forma independente da existência de um Sistema Digital de Controle na subestação.

Entretanto, a instalação do Sistema Especialista numa subestação que possua um Sistema Digital de Controle (Centralizado ou Distribuído), facilitará a sua utilização e melhorará seu desempenho, pois utilizará dados obtidos automaticamente e disponíveis na base de dados do Sistema Digital de Controle.

#### 4.5.2. Suas Funções:

O Sistema Especialista poderá realizar suas funções automaticamente ou a pedido do operador:

- .a. No caso de Atendimento de Contingências, a operação poderá ser automática (quando da abertura por proteção de um ou mais disjuntores) ou feita pelo Operador. Como resposta, serão fornecidos os procedimentos operacionais para reestabelecer as condições normais de operação da subestação.
- .b. No caso de Tratamento de Alarmes, a consulta poderá ser automática ou feita pelo operador, dependendo da disponibilidade ou não de informações digitalizadas. Como resultados, serão indicadas as causas com suas respectivas prioridades de atendimento.
- .c. No caso de Diagnóstico de Defeitos, a consulta será sempre feita pelo operador e o Sistema Especialista indicará as causas mais prováveis para o problema proposto.



#### 4.5.3. Seu Funcionamento Interno:

- .a. O Motor de Interência do Sistema Especialista deve possuir alta velocidade de inferência; para isto deve ter uma estrutura de controle eficiente que otimize a procura das respostas;
- .b. Devem ser estabelecidas normas para consultas e alterações na Base de Conhecimento:
  - Alterações na Base de Conhecimento são permitidas quando é necessário registrar ampliações, mudanças de filosofia de operação, troca de equipamentos, etc. A consistência dos dados introduzidos deve ser verificada para se evitar elementos isolados dentro da estrutura de árvore da base.
- .c. Uma Base de Trabalho é necessária para permitir armazenar as seqüências de raciocínio, os fatos confirmados e as conclusões intermediárias, permitindo desta forma o acesso às justificativas para as conclusões finais.

#### 4.6. ESTRUTURA DE UM SISTEMA ESPECIALISTA PARA APOIO A OPERAÇÕES:

Um Sistema Especialista que atenda as especificações anteriores pode ser estruturado conforme mostrado na figura 4.1 (LACERDA, 86).

Cada um dos módulos que o compõe tem suas funções brevemente descritas a seguir e serão detalhadas no próximo capítulo:

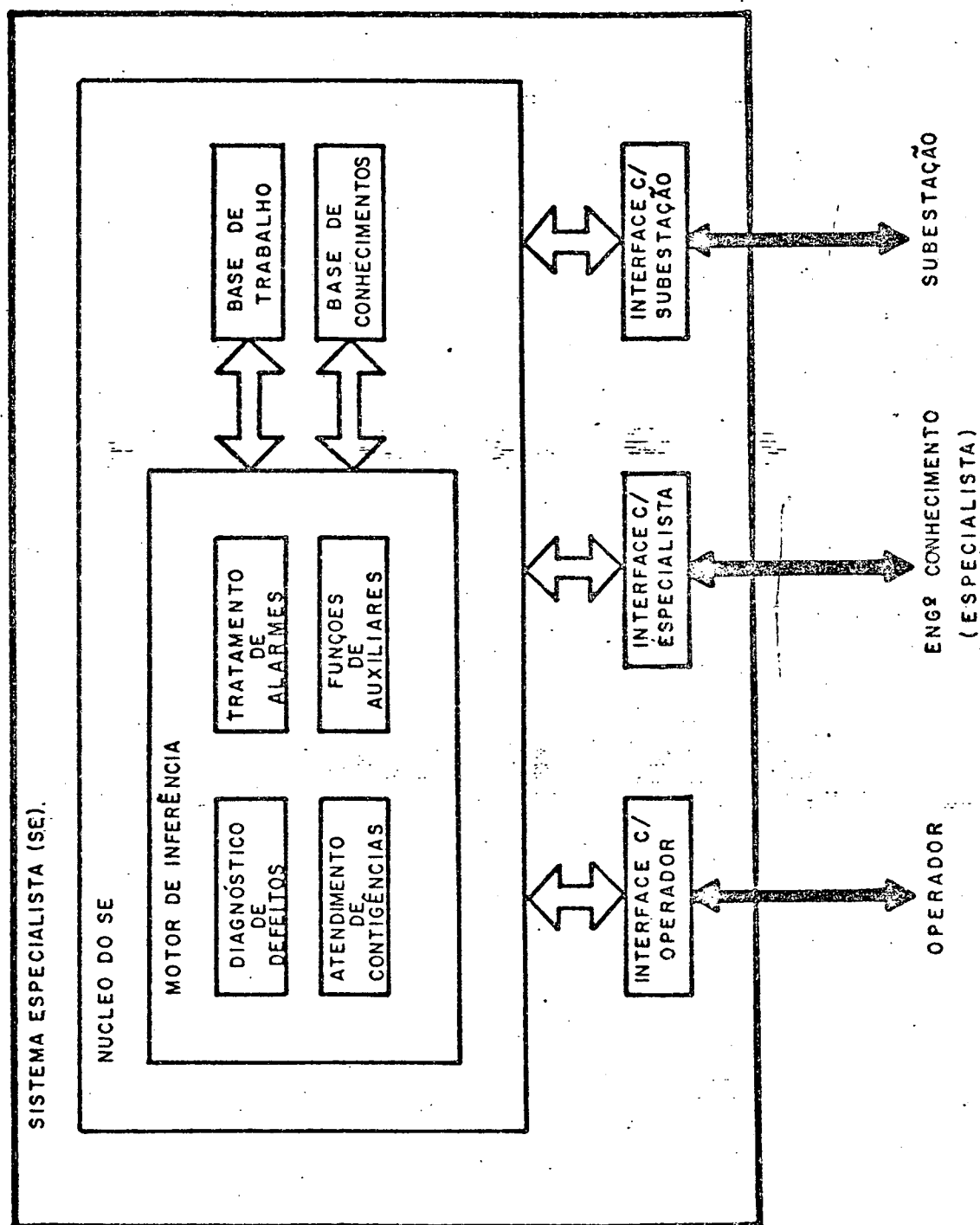


FIG. 4.1 - ESTRUTURA DE UM SISTEMA ESPECIALISTA PARA AUXÍLIO A OPERAÇÃO DE SUBESTAÇÕES

.a. Base de Conhecimento:

Nela estão registradas as características de interesse da subestação, como por exemplo:

- Descrição do projeto;
- Características funcionais;
- Características operacionais;
- Alarmes existentes;
- Intertravamentos;
- Sequências de manobras;
- Denominação de equipamentos;
- etc.

Todo este conhecimento é estruturado na forma de uma árvore e é representado por fatos e regras.

.b. Motor de Inferência:

Possui implementadas as funções de diagnósticos de defeito, de tratamento de alarmes e de atendimento de contingências, com suas respectivas heurísticas, procedimentos para justificativa de perguntas e respostas, bem como os procedimentos de avaliação da confiabilidade e/ou prioridade de uma solução.

Estes dois módulos formam o Núcleo do Sistema Especialista.

.c. Base de Trabalho:

É uma base de dados de natureza temporária, onde são

armazenados os fatos e conclusões obtidos durante o processo de solução de um problema.

.d. Interface com Usuário:

É através dela que o operador da subestação terá acesso ao Sistema Especialista, podendo então realizar consultas, obter informações diversas, questionar e obter as respostas desejadas. Este processo de comunicação é bastante simplificado com a adoção de menus e estruturas simples de linguagem natural.

.e. Interface com a Subestação:

Permite a aquisição de dados em tempo real diretamente dos equipamentos ou em um banco de dados do Sistema Digital de Controle existente; além disto, deve permitir futuramente a ação (controle) do Sistema Especialista sobre os equipamentos.

.f. Interface com Perito:

Facilita a alteração da Base de Conhecimentos, permitindo, desta maneira, que eventuais expansões, modificações e troca de equipamentos e de filosofias na subestação sejam registradas.

#### 4.7. PROPOSTA DE TRABALHO:

Neste trabalho, optou-se por um desenvolvimento do Sistema

Especialista em etapas com objetivos previamente definidos a partir:

- da avaliação dos diferentes níveis de dificuldades do problema. Por exemplo, a influência das possíveis mudanças do estado da subestação durante a fase de procura de uma solução, será desconsiderada numa primeira etapa, para efeito de simplificação;
- das dificuldades práticas da implementação atual de alguns módulos tal como o módulo de interface com a subestação, devido a inexistência no momento de uma subestação automatizada na qual o Sistema Especialista possa ser introduzida;

A partir destas considerações, as etapas de trabalho propostas são as seguintes:

1a. Etapa:

Nesta etapa serão desenvolvidos o Núcleo do Sistema Especialista e as Interfaces com o Operador e o Engenheiro do Conhecimento. Ao final desta etapa, o Sistema deve estar apto, quando solicitado, a auxiliar o operador da subestação na execução das funções de Tratamento de Alarmes e Diagnósticos de Defeitos. As informações requisitadas pelo Sistema Especialista serão, nesta etapa, todas fornecidas pelo operador.

### 2a. Etapa:

Esta etapa consiste basicamente na implementação da Interface com a Subestação. A aquisição de dados será feita diretamente na Base de Dados do Sistema Digital de Controle, ou quando estes não forem mensuráveis automaticamente, serão fornecidos pelo operador. Em consequência, a função Tratamento de Alarmes será executada automaticamente.

### 3a. Etapa:

Nesta etapa serão implementadas as funções Atendimento de Contingências e de emissão de sinais de controle do Sistema Especialista para o Sistema Digital de Controle da Subestação.

Devido as limitações de tempo existentes para realização do presente trabalho, decidiu-se desenvolver e implementar uma primeira versão de um protótipo utilizável que corresponde às especificações definidas para a primeira etapa, ficando as outras etapas para serem desenvolvidas em trabalhos posteriores. Desta forma, pretende-se, neste trabalho, melhorar o entendimento sobre o desenvolvimento e o funcionamento de um Sistema Especialista para Apoio à Operação de Subestações de Alta Tensão, bem como sobre Sistemas Especialistas em geral, e mostrar também a validade da proposta feita.

A versão inicial do Sistema Especialista apresentada a seguir permitirá o acesso às funções de Tratamento de Alarmes e Diagnóstico de Defeitos, a partir da consulta do operador. A função de Atendimento das Contingências não foi incluída nesta

versão em virtude das seguintes considerações:

- .a. Para cada subestação, todas as seqüências operacionais já estão previamente definidas, restando ao operador apenas executá-las de forma sistemática; o processo de automatização desta função consiste em implementar um módulo que execute automaticamente as seqüências pré-definidas, sem necessitar de nenhum processo de inferência. Devido às características citadas e à simplicidade deste processo, este módulo não será implementado nesta versão inicial.
- .b. Além disso, a definição destas seqüências operacionais envolvem considerações sobre fluxo de potência, níveis de tensão, condições de estabilidade, características da subestação em pauta e das outras subestações do sistema, normas de operação e outras. O grau de complexidade atingido neste caso necessita um estudo mais abrangente onde deve ser levado em conta o sistema elétrico como um todo para poder definir os procedimentos operacionais posteriormente aplicados a cada subestação; este estudo extrapola a proposta do presente trabalho, ficando para trabalhos futuros.

#### 4.8. CONCLUSÃO:

Neste capítulo foram descritas as características gerais que um Sistem Especialista deve possuir para ser aplicado no auxílio à operação de subestações, em particular no que concerne

a sua instalação, as funções que ele deve realizar e as características do seu funcionamento interno. Foi também apresentada a estrutura geral que este Sistema Especialista deve ter e uma proposta para seu desenvolvimento, na qual destacou-se três etapas, sendo a primeira delas o objetivo deste trabalho. No capítulo seguinte, será apresentado detalhadamente um protótipo, desenvolvido segundo às características aqui desfinidas.



## CAPÍTULO 5.

### DESCRIÇÃO DO PROTÓTIPO DO SISTEMA ESPECIALISTA PARA AUXÍLIO À OPERAÇÃO DE SUBESTAÇÕES

#### 5.1. INTRODUÇÃO:

No capítulo anterior foi descrita a estrutura geral do Sistema Especialista proposto para auxílio à operação de subestações de alta tensão, destacando, em particular, as funções que ele deve realizar.

Dentro da perspectiva de desenvolver e colocar em operação uma primeira versão deste Sistema Especialista sem a Interface com a Subestação e as funções de controle, um protótipo foi projetado, implementado e testado, com o objetivo de validação da proposta e de avaliação de seu desempenho.

Neste capítulo são descritos os vários módulos que compõem o Sistema Especialista e são apresentados e analisados alguns resultados dos testes realizados.

#### 5.2. BASE DE CONHECIMENTO:

Ela contém a descrição detalhada da subestação com as suas principais características. A seguir é apresentada a forma como estas informações são organizadas.

##### 5.2.1. Representação do Conhecimento:

As características relevantes da subestação relativas ao seu

funcionamento normal e anormal, incluindo a descrição do projeto e de equipamentos, são registrados na Base de Conhecimentos .

.a. Nome da Subestação:

ex.: nome\_da\_subestação ("FLORIANÓPOLIS")

.b. Nome do Bay:

São declarados respectivamente o número do bay e o seu nome.

ex.: nome\_do\_bay (5, "LT FLORIANÓPOLIS I")

.c. Um dicionário:

Cada equipamento é representado no sistema, por um código interno .Para facilitar o diálogo com Operador, um dicionário permite relacionar este código com seu respectivo nome, e um caracter de controle ("e" ou "i"). O caracter "e" indica que o código do equipamento pode ser explicitado pelas interfaces de saída, pois trata-se de uma representação estabelecida em normas internacionais, enquanto que o caracter "i" indica que a utilização do código será exclusivamente interna.

ex.: dicionário(e,"52","DISJUNTOR");

dicionário(i,"OLEOT","OLEO DO TRANSFORMADOR").

.d. Fatos:

Relacionam um Equipamento que pertença a um Bay, com um determinado estado .

.e. Descrição dos Alarmes:

Descrevem fatos que representem situações perigosas ou

emergenciais.

ex.:alarme\_existente(3,"52","ABRIU P/ PROTEÇÃO",  
((135,138)()))

.b. Regras:

As regras descrevem as características funcionais e operacionais da subestação. Estruturas de regras de produção são suficientes para descrever todas as relações do tipo causa-efeito numa subestação. As regras devem permitir expressar os seguintes tipos de relações:

- relações simples do tipo: SE a ENTÃO b;
- relações "OU" do tipo: SE a ENTÃO b OU c
- relações "E" do tipo: SE a ENTÃO b E c
- relações combinadas, como por exemplo:  
SE a ENTÃO b E c OU d E e E f

A estrutura das regras, descrita segundo formalismo EBNF (Extended Backus Naur-Formalism), é mostrada na fig. 5.1, onde são apresentadas as diferenças entre as representações interna (como registrada na Base de Conhecimentos) e externa (como se apresenta ao usuário) das mesmas. Os exemplos mostrados nas figuras 5.2 e 5.3, tornam claras estas diferenças.

5.2.2. Estrutura da Base:

As regras estão organizadas dentro da Base de Conhecimento segundo uma estrutura do tipo árvore.

```

NR          ::= <inteiro>                (Numero da Regra ( >0 ))
FU          ::= <inteiro>                (Fator de Utilizacao ( 0,1 ))
FC          ::= <real>                   (Fator de Confianca ( 0..1))
nome        ::= <string>                 (Ate' 50 characters)
sintoma     ::= <string>                 (Ate 15 caracteres)

lista_inteiros ::= "["<inteiro>"]" |
                  "["<inteiro>","<lista_inteiros>"]"

bay_e       ::= " " |                   (Quando aplicado a transfor-
                  <lista_inteiros>      madores ou outros equipa-
                                          mentos nao vinculados a um
                                          bay especifico)

bay_i       ::= <lista_inteiros> |       (Para o lado esquerdo)
                  <string>              (Para o lado direito)

codigo_e    ::= " " |                   (Para codigo de uso interno
                  <string>              conforme definido no "di-
                                          cionario" )
                                          (Ate' 10 caracteres para co-
                                          digo de uso interno e ex-
                                          terno)

equipamento_e ::= <nome_e><bay_e><codigo_e>
equipamento_i ::= <string>
causa_i      ::= <bay_i><equipamento_i><sintoma>
problema_e   ::= <equipamento_e><sintoma_e>
problema_i   ::= "["<causa_i>"]"
lista_problema_i ::= "["<problema_i>"]" |
                    "["<problema_i>","<lista_problema_i>"]"

lado_esquerdo_e ::= <problema_e>
lado_esquerdo_i ::= <causa_i>
lado_direito_e  ::= <problema_e1>
                    "E"
                    <problema_e2>
                    :
                    "E"
                    <problema_en>

lado_direito_i  ::= <lista_problema_i>

regra_e        ::= "SE" <lado_esquerdo_e>
                  "ENTAO" <lado_direito_e>

regra_i        ::= <lado_esquerdo_i><lado_direito_i>

REGRA_e        ::= <regra_e> "("<NR>)" "Conf.:"<FC> "FU="<FU>

REGRA_i        ::= <NR><regra_i><FU><FC>

REGRA          ::= REGRA_e |           (Representacao externa)
                  REGRA_i              (Representacao interna)

```

Fig. 5.1 - Representacao EBNF das Regras

SE : CHAVE DE BY-PASS [4]89C NAO OPERA  
 ENTAO: CHAVE LOCAL-REMOTO [5]LR ESTA' NA POSICAO ERRADA (24) Conf.:1 (FU=1)

SE : CHAVE DE BY-PASS [4]89C NAO OPERA  
 ENTAO: CORRENTE CONTINUA FALTANDO NO CIRCUITO 4 (34) Conf.:1 (FU=1)

SE : CHAVE DE BY-PASS [4]89C NAO OPERA  
 ENTAO: CHAVE DE TRANSFERENCIA DA PROTECAO [4]43 ESTA' NA POSICAO T/I  
 E  
 RELE DE BLOQUEIO DO TRANSFORMADOR T3 [6]86-T3 ESTA' OPERADO (55) Conf.:1 (FU=1)

SE : RELE DE BLOQUEIO DO TRANSFORMADOR T3 [6]86-T3 ESTA' OPERADO  
 ENTAO: IMAGEM TERMICA DO TRANSFORMADOR T3 [6]49-T3 ESTA OPERADO (61) Conf.:1 (FU=1)

SE : RELE DE BLOQUEIO DO TRANSFORMADOR T3 [6]86-T3 ESTA' OPERADO  
 ENTAO: RELE BUCHHOLZ DO TRANSFORMADOR T3 [6]63-T3 ESTA OPERADO (62) Conf.:1 (FU=1)

SE : IMAGEM TERMICA DO TRANSFORMADOR T3 [6]49-T3 ESTA OPERADO  
 ENTAO: ENROLAMENTO PRIMARIO DO TRANSFORMADOR T3 ESTA' COM TEMPERATURA ELEVADA (81) Conf.:0.6 (FU=0)

SE : IMAGEM TERMICA DO TRANSFORMADOR T3 [6]49-T3 ESTA OPERADO  
 ENTAO: ENROLAMENTO SECUNDARIO DO TRANSFORMADOR T3 ESTA' COM TEMPERATURA ELEVADA (82) Conf.:0.4 (FU=0)

Fig. 5.2 - Representacao Externa das Regras

```

regra(24,[4],"89C","NAO OPERA",[["4","LR","NA POSICAO ERRADA"]],1,1)
regra(34,[4],"89C","NAO OPERA",[["4","CC","FALTANDO NO C4"]],1,1)
regra(55,[4],"89C","NAO OPERA",[["4","43","NA POSICAO T/I"],["6","86-T3","OPERADO"]],1,1)
regra(61,[6],"86-T3","OPERADO",[["6","49-T3","OPERADO"]],1,1)
regra(62,[6],"86-T3","OPERADO",[["6","63-T3","OPERADO"]],1,1)
regra(81,[6],"49-T3","OPERADO",[["6","COBRE1-T3","OPERADO"]],0,0,6)
regra(82,[6],"49-T3","OPERADO",[["6","COBRE2-T3","OPERADO"]],0,0,4)
  
```

Fig. 5.3 - Representacao Interna das Regras

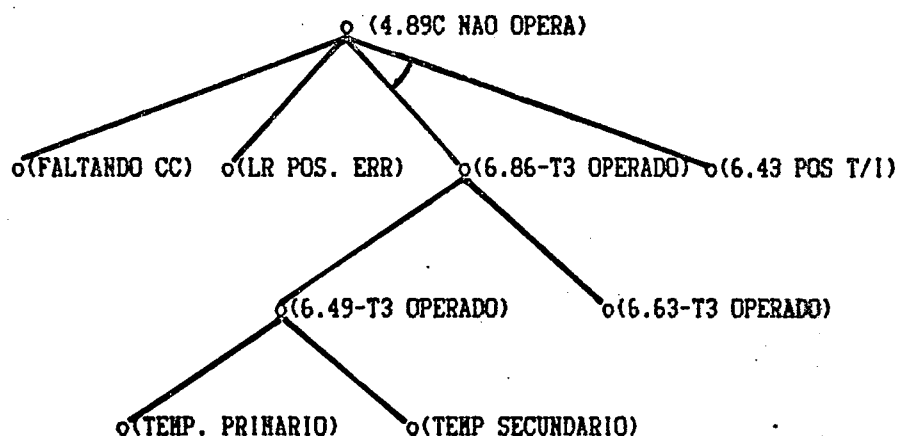


Fig. 5.4- Estrutura das Regras. Setor de Arvore.

A construção desta árvore é feita a partir do encadeamento das regras, que consiste para cada ENTÃO em gerar um SE correspondente, a partir do qual serão incluídos ENTÃO's subsequentes.

Para ilustrar esta estrutura, mostra-se na figura 5.4 um setor da árvore construída a partir das regras mostradas como exemplos no item anterior.

#### 5.2.3. Fator de Confiança de uma Regra:

A cada regra  $R_i$  é associado um Fator de Confiança  $FCR_i$ , cujo valor, incluído entre 0 e 1, indica o grau de certeza na aplicação desta regra. O valor do Fator de Confiança é atribuído em função da experiência do especialista e de levantamentos estatísticos relativos à aplicação da regra.

#### 5.2.4. Fator de Certeza de uma Solução:

O Fator de Confiança das Regras é usado dentro do processo de procura com objetivo de permitir calcular para cada solução parcial encontrada, um Fator de Certeza. O Fator de Certeza permite concluir quais as soluções parciais mais promissoras para alcançar uma solução, e também, classificar as diversas soluções obtidas.

Para tal, para cada nó  $N_i$  da árvore de procura é calculado o Fator de Certeza  $FC_i$  da solução parcial representada por  $N_i$ , a partir dos Fatores de Confiança das regras utilizadas no caminho do no-raiz até o nó  $N_i$ .

No sistema MYCIN (SHORTLIFFE, 76), o Fator de Certeza é

calculado da seguinte maneira:

$$FCi = \prod_{j=1}^i FCRj$$

onde os FCRj representam os Fatores de Confiança das regras utilizadas.

O Fator de Certeza assim calculado, é muito sensível a uma queda no Fator de Confiança de uma regra utilizada ao longo do caminho. Isto permite realizar a poda das soluções parciais pouco promissoras. Entretanto, esta medida tende a 0 (zero), quando o número das regras utilizadas é muito grande, ou seja, quando a procura atinge níveis profundos da árvore de procura, este cálculo leva a baixos valores do Fator de Certeza, mesmo que esta procura tenha sido efetuada sobre regras de Fator de Confiança elevado.

A alternativa proposta neste trabalho consiste em calcular o Fator de Certeza como sendo a média geométrica das medidas precedentes, ou seja:

$$FCi = \sqrt[i]{\prod_{j=1}^i FCRj}$$

Desta maneira, o efeito da profundidade é eliminado sobre o Fator de Certeza, mantendo entretanto o efeito de queda do valor das soluções parciais, embora que, um pouco reduzido.

No caso de uma solução ser atingida por dois caminhos diferentes, ou seja, no caso de existir uma mesma causa para dois

problemas diferentes, o Fator de Certeza (FCi) desta solução será dado por (SHORTLIFFE, 76) :

$$FCi = FCi1 + FCi2 - FCi1 * FCi2$$

onde FCi1 e FCi2 são os Fatores de Certeza correspondentes a cada caminho percorrido para atingir a solução.

#### 5.2.5. Fator de Utilização:

O Fator de Utilização (FU) tem como única finalidade indicar se uma regra pode ser confirmada diretamente a partir de informações oriundas da Base de Dados do Sistema Digital de Controle, ou, nesta primeira fase de implementação, através do Operador da Subestação. Para estas regras é atribuído o valor "FU=1", e em caso contrário, o valor "FU=0".

### 5.3. INTERFACES:

Devido a inexistência da Interface com a Subestação nesta implementação, toda a ativação e comunicação do Sistema Especialista, será feita através das Interfaces com o Operador e com o Especialista, as quais são ativadas a partir de um processo de Inicialização.

#### 5.3.1. Inicialização:

Permite configurar e definir quem fará uso do sistema (o Especialista ou o Operador). As operações que podem ser ativadas através desta Interface são:

- Carregamento da Base de Conhecimentos relativa à subesta-



ção a ser analisada;

- Definição do tipo de manipulação a ser realizado sobre a Base de Conhecimentos (Consulta ou Modificação), o que só é possível após o carregamento de uma Base de Conhecimentos;
- Criação e arquivamento de uma nova Base de Conhecimentos.

### 5.3.2. Interface com o Operador:

Esta Interface é ativada quando a opção de Consulta à Base de Conhecimentos é selecionada na Inicialização. Esta interface permite dar entrada, a partir de um menu, às funções de Tratamento de Alarmes e Diagnóstico de Defeitos, além de fornecer informações sobre condições de intertravamento. A comunicação entre o Sistema e o Operador durante o processo de procura é também realizada a partir desta interface.

#### .a. Tratamento de Alarmes:

Esta função permite determinar a(s) causa(s) de atuação de um ou vários alarmes, bem como a existência de causas comuns entre eles.

.a.1. Entradas: Devem ser fornecidos ao sistema os números que identificam cada um dos alarmes que atuaram.

.a.2. Saídas: Como resposta as seguintes informações podem ser obtidas:

- a causa isolada de cada alarme;
- a causa comum a vários alarmes;
- a sequência de raciocínio para obtenção das conclusões;
- a ordenação das respostas em função das causas mais prováveis.

.b. Diagnóstico de Defeitos:

Esta função permite determinar a(s) causa(s) de defeitos ou mal funcionamento de equipamentos.

.b.1. Entradas: Através desta interface são fornecidos ao sistema uma série de trinômios, onde cada um representa um defeito num equipamento e é composto dos seguintes elementos:

- número do bay ao qual o equipamento pertence;
- código do equipamento;
- sintoma apresentado pelo equipamento.

.b.2. Saídas: Como resposta, as seguintes informações podem ser obtidas:

- a causa isolada de cada defeito;
- a causa comum a vários defeitos;
- a sequência de raciocínio para obtenção das respostas;
- a ordenação das respostas em função das causas mais prováveis.

.c. Intertravamentos:

Esta função permite verificar as condições de operação e não operação das chaves seccionadoras e dos disjuntores. Este recurso adicional oferecido pelo Sistema, não necessita de mecanismos de inferência pois utiliza um processo de acesso direto à Base de Conhecimentos.

.c.1. Entradas: São introduzidas as seguintes informações:

- Número do Bay;
- Código do Equipamento.

.c.2. Saídas: São apresentadas as regras que descrevem as leis de intertravamento do referido equipamento.

.d. Comunicação com o Operador Durante a Procura:

Nesta primeira etapa do trabalho, todos os dados que o Sistema Especialista necessitar para o processo de procura das soluções prováveis, serão requisitados ao operador através deste recurso da interface.

Numa implementação com aquisição automática de dados, esta função seria realizada automaticamente através de consulta à Base de Dados do Sistema Digital de Controle.

.e. Justificativas:

A interface fornece também um recurso que permite

apresentar as respostas às seguintes indagações:

- Porque o sistema está precisando de determinadas informações ?;
- Como o sistema chegou a determinada(s) conclusão(ões)?.

### 5.3.3. Interface com Especialista:

Esta interface permite, através de um menu, consultar, modificar, ou criar uma Base de Conhecimentos. Os recursos oferecidos e a simplicidade de manipulação a tornam acessível tanto ao Engenheiro do Conhecimento quanto ao Especialista. As principais operações disponíveis são:

#### .a. Adicionar e Retirar Bays:

Permite ao Especialista incluir ou retirar da Base de Conhecimentos, Bays que eventualmente venham a ser construídos ou retirados da Subestação, os quais são identificados por um número e um nome.

#### .b. Adicionar Novos Alarmes:

Permite a inclusão de novos pontos de alarmes pela introdução das seguintes informações:

- Número do Alarme;
- Número do Bay;
- Código do equipamento que causa atuação do alarme;
- Causa da atuação.

Cada vez que um novo alarme é adicionado, uma busca é realizada na Base de Conhecimentos com objetivo de determinar as diretivas deste novo alarme dentro da árvore de procura. Esta procura fornece, como resultado, duas listas:

- uma lista contendo as diretrizes com FU=1;
- uma lista contendo as diretrizes com FU=0.

Caso as duas sejam listas vazias, a introdução deste novo alarme é rejeitada.

.c. Retirar Alarmes:

Permite cancelar um alarme existente na Base de Conhecimentos indicando apenas o Número de Alarme.

.d. Adicionar Novas Regras:

A seleção desta opção permite ao Especialista acessar a Base de Conhecimento com a finalidade de incluir ou modificar regras.

.d.1. Descrição da Operação: São introduzidas as informações necessárias, que dizem respeito aos lados esquerdo e direito da regra.

Após estas informações terem sido introduzidas, são realizadas automaticamente as seguintes operações:

- verificação da existência da regra;
- verificação da existência de ascendentes e descendentes dentro da estrutura da Base de

Conhecimentos, afim de evitar que esta nova regra fique isolada dentro da árvore de procura; no caso contrário, esta regra passa a ser um novo nó raiz .

- numeração da regra: o número atribuído a nova regra é gerado a partir do último número de ordem existente ou a partir de lacunas existentes na seqüência de numeração das regras existentes.

.d.2. Descrição do Processo: O procedimento de entrada das regras está baseado num algoritmo de encadeamento em profundidade, e na organização dos lados esquerdo e direito das mesmas em listas. Este procedimento pode ser, resumidamente, descrito da seguinte maneira:

- i - O Especialista dá entrada ao lado esquerdo da regra que deseja acrescentar à Base de Conhecimentos;
- ii - O Sistema mostra ao Especialista todas as regras (lados direitos) já existentes na Base de Conhecimentos, relativos ao lado esquerdo introduzido;
- iii - Das regras que desejava acrescentar, o Especialista introduz apenas aquelas que não existem na Base de Conhecimentos, dando entrada aos seus respectivos lados direitos.

iv - Uma vez terminada esta operação, o Sistema passa automaticamente a mostrar novas regras, considerando cada lado direito recém introduzido como lado esquerdo, e o processo se repete até todas as regras terem sido introduzidas na Base de Conhecimentos.

.e. Retirar Regras:

Regras podem ser eliminadas da Base de Conhecimentos, a partir do simples fornecimento do seu número de identificação.

.f. Consultas Diversas:

Esta operação permite ao Especialista ter acesso a todas as regras da Base de Conhecimentos que atendam a qualquer combinação dos seguintes elementos:

- Número da Regra;
- Número do Bay;
- Código do Equipamento;
- Sintoma Apresentado.

5.3.4. Análise dos Dados:

Em todas as operações de entrada é realizada uma crítica sobre cada elemento e sobre o conjunto desta entrada, a fim de verificar a sintaxe, a coerência sintática, e a existência da informação introduzida e também uma possível redundância.

Outrossim, qualquer alteração na Base de Conhecimentos, principalmente no que diz respeito à inclusão de equipamentos e sintomas desconhecidos, é possível somente mediante confirmação do Especialista, garantindo desta forma sua proteção.

#### 5.4. BASE DE TRABALHO:

Neste módulo são registradas as informações de caráter temporário, isto é, relativas a uma consulta particular, tais como:

- .a. As regras disparadas (recebem o atributo "EH\_CAUSA");  
As regras que não podem ser disparadas (recebem o atributo "NÃO\_EH\_CAUSA");  
As regras filtradas mas ainda não disparadas (recebem o atributo "AINDA\_SEM\_JUSTIFICATIVA");  
As regras terminais (recebem o atributo "EH\_SOLUÇÃO");
- .b. Seqüência de raciocínio;
- .c. Conclusões obtidas;

Estas informações são destruídas tão logo uma nova consulta seja iniciada.

#### 5.5. MOTOR DE INFERÊNCIA:

##### 5.5.1. A Técnica de Procura:

Uma vez que se deseja determinar as causas de fatos perfeitamente conhecidos (alarmes ou defeitos), adotou-se a procura para frente. Algumas características inerentes às subestações, tais como, árvores de procura não muito profundas nem muito



largas, além da necessidade de economia no espaço de memória levaram a utilização da procura em profundidade, com backtracking.

#### 5.5.2. Estratégias de Procura:

Tanto para o Tratamento de Alarmes quanto para o Diagnóstico de Defeitos, procurou-se reproduzir aproximadamente a estratégia adotada pelo operador da subestação nestes casos.

##### .a. Estratégia de Operação:

Pode-se descrever resumidamente o processo de diagnóstico feito por um operador da seguinte maneira:

- Obtenção de todas as informações disponíveis e de interesse na sala de controle, tais como alarmes atuados, sinalizações de estados e indicação de medidores;
- Análise das informações obtidas, usando sua experiência ou consultando diagramas construtivos. Esta análise consiste basicamente em :
  - Para cada evento, tentar obter das informações disponíveis, quais são aquelas que podem explicá-lo;
  - Caso uma solução não seja encontrada, ou não seja suficientemente detalhada, tentar obtê-la a partir de consultas a diagramas construtivos ou a partir de sua experiência com eventos anteriormente ocorridos;
  - Se mais de uma solução for encontrada,

classifica-las.

- Conclusão a respeito das causas mais prováveis dos defeitos ou dos alarmes.

.b. Proposta para o Processo de Procura do Sistema Especialista:

Baseado na abordagem apresentada anteriormente, foi desenvolvido, para o Sistema Especialista, um processo de procura visando sistematizar o processo acima descrito. Para isto, este processo foi dividido em três fases:

1a. Fase: Procura com Auxílio do Operador ou da Interface com a Subestação

Esta fase visa registrar os fatos realmente acontecidos, a partir de informações obtidas através do Operador ou da Interface com a Subestação, restringindo desta forma o espaço de procura.

A procura é feita em profundidade, utilizando as regras caracterizadas por FU=1.

Para cada nó da árvore de procura, são determinados todos os descendentes com FU=1, e eliminados aqueles que já tenham recebido anteriormente, através do diálogo com o operador, uma confirmação do tipo "É CAUSA" ou "NÃO É CAUSA". Os descendentes restantes são mostrados ao operador, que então confirma ao Sistema se algum deles representa um fato realmente constatado. Aqueles que receberem confirmação serão registrados na Base de

Trabalho como "EH\_CAUSA", e os restantes como "NÃO\_EH\_CAUSA".

O processo continua sobre os descendentes confirmados pelo o Operador como "É CAUSA" até que não existam mais descendentes com  $FU=1$ . Os nós sem descendentes são registrados então, temporariamente, como "AINDA SEM JUSTIFICATIVA". A partir deste ponto, tem início a 2a. fase.

#### 2a. Fase: Determinação das Causas:

Esta fase visa determinar todas as soluções correspondentes a cada defeito ou alarme, com seus respectivos Fatores de Certeza, a partir das regras registradas na fase anterior como "AINDA SEM JUSTIFICATIVA". A partir dos nós sem descendentes da fase anterior, é realizada uma nova procura em profundidade, utilizando regras com  $FU=0$ . Para cada descendente é calculado um valor de Fator de Certeza conforme descrito no item 5.2.4.

Quando uma solução é encontrada, isto é, quando não existem mais descendentes, é atribuída à respectiva regra, a denominação de "EH\_SOLUÇÃO", a qual é registrada na Base de Trabalho.

#### 3a. Fase: Obtenção das Conclusões

A partir das soluções geradas na fase anterior, é possível obter as conclusões do problemas que dizem

respeito a:

- A(s) causa(s) de um alarme ou defeito, com seu respectivo Fator de Certeza;
- A(s) causa(s) comum(ns) a vários alarmes ou vários defeitos; este resultado é obtido percorrendo-se o sentido inverso da árvore de procura anteriormente gerada, isto é, procurando os efeitos a partir das causas;
- A classificação das conclusões, em função de seus fatores de confiança;
- As justificativas para as conclusões, transcrevendo na ordem de raciocínio, todas as conclusões intermediárias armazenadas na Base de Trabalho durante o processo de procura, com a indicação dos fatos que foram estabelecidos como causas, e das regras utilizadas.

#### 5.6. Características do Protótipo:

O protótipo foi implementado e testado num microcomputador IBM-PC compatível, em linguagem PROLOG, e recebeu a seguinte denominação que será utilizada para caracterizá-lo: MINOS (Módulo Inteligente para Operação de Subestações).

Atualmente duas versões são disponíveis:

- Versão para uso do Operador, a qual possui somente os recursos para Consulta à Base de Conhecimentos. Ocupa

aproximadamente 250 kbytes de memória.

- Versão para uso exclusivo do Especialista, com todos os recursos disponíveis para consulta e manipulação da Base de Conhecimentos que ocupa aproximadamente 365 Kbytes de memória.

As interfaces do protótipo oferecem facilidades operacionais para o usuário, tais como a apresentação de janelas associadas a cada etapa de operação, a possibilidade de obter a cada instante informações de apoio, a introdução de dados para consulta ou modificação na Base de Conhecimentos feita por simples preenchimento de campos específicos, a verificação automática de sintaxe, coerência e existência das informações introduzidas, e a opção de apresentar as soluções e as justificativas via impressora.

#### 5.7. Exemplos de Utilização do Sistema Especialista MINOS:

A seguir são apresentados dois exemplos de utilização do protótipo MINOS, respectivamente para Tratamento de Alarmes e Diagnóstico de Defeitos. Em cada um deste exemplos, após a exposição do problema a tratar, é reproduzido o diálogo entre o Sistema Especialista e o Operador e, no final deste, as conclusões com suas respectivas justificativas.

##### 5.7.1. Exemplo de Utilização para Tratamento de Alarmes:

###### a. Problema a tratar:

Um defeito na subestação causou a abertura dos

disjuntores dos Bays 6 e 39. Os seguintes alarmes atuaram:

Alarme num. 2: Abriu o Disjuntor (6)52;  
 Alarme num. 6: Abriu o Disjuntor (39)52;  
 Alarme num. 9: Operou Relé de Bloqueio 86-T3;  
 Alarme num. 22: Operou Relé Buchholz 63-T3.

b. Consulta ao Sistema Especialista:

A consulta ao Sistema Especialista inicia com o fornecimento dos números de todos os alarmes que atuaram. A partir deste ponto, começa o processo de procura e o diálogo com o Operador, com a finalidade de obter maiores informações sobre os problemas ocorridos.

MINOS : - (6)86X-T3 OPERADO  
 - PORQUE  
 - NENHUMA DAS OPÇÕES

OPERADOR : - NENHUMA DAS OPÇÕES

MINOS : - (6)94C OPERADO  
 - (6)49-T3 OPERADO  
 - (6)26-T3 OPERADO  
 - (6)50/51A OPERADO  
 - (6)50/51B OPERADO  
 - (6)50/51C OPERADO  
 - (6)87A OPERADO  
 - (6)87B OPERADO

- (6)87C OPERADO
- PORQUE
- NENHUMA DAS OPÇÕES

OPERADOR : - NENHUMA DAS OPÇÕES

- MINOS :
- (39)50/51N OPERADO
  - (39)50/51C OPERADO
  - (39)50/51B OPERADO
  - (39)50/51A OPERADO
  - PORQUE
  - NENHUMA DAS OPÇÕES

OPERADOR : - NENHUMA DAS OPÇÕES

Neste ponto, o Sistema Especialista encerra o diálogo com o Operador e após poucos segundos, está em condições de fornecer as conclusões .

#### Conclusões:

Na fig. 5.5 são mostradas as conclusões para o problema acima conforme fornecidas pelo Sistema MINOS:

- 1 - ALARMES : [6]52 ABRIU : [6]86-T3 OPERADO : [6]63-T3 OPERADO :  
CAUSA : (1)TRANSFORMADOR 3 - 138/23 kV(T3) ESTA' COM CURTO CIRCUITO INTERNO (118)
- 2 - ALARME : [39]52 ABRIU :  
CAUSA : (1)TRANSFORMADOR 3 - 138/23 kV(T3) ESTA' COM CURTO CIRCUITO INTERNO (118)

Fig. 5.5 - Conclusões

Justificativas:

O Sistema MINOS oferece também ao Operador, a possibilidade de obter as justificativas para cada uma das conclusões obtidas. Na fig 5.6 são mostradas as justificativas para a conclusão num. 1 acima :

Conclusao numero :1

Com as informacoes disponiveis e possivel concluir com certeza (1) que os seguintes alarmes:

Alarme num. 2 Bay :[6]  
52 - ABRIU

Alarme num. 19 Bay :[6]  
86-T3 - OPERADO

Alarme num. 22 Bay :[6]  
63-T3 - OPERADO

tem como causa o seguinte fato:

TRANSFORMADOR T3 - 138/23 kV(T3) ESTA' COM CURTO CIRCUITO INTERNO (118)

Porque :

1.- Foram confirmados os seguintes fatos:

- 1: RELE BUCHHOLZ DO TRANSFORMADOR T3[6](63-T3) ESTA' OPERADO(89)
- 2: RELE DE BLOQUEIO DO TRANSFORMADOR T3[6](86-T3) ESTA' OPERADO(83)

2.- Foram utilizadas as seguintes regras:

SE :DISJUNTOR[6,39](52) ABRIU

ENTAO:RELE DE BLOQUEIO DO TRANSFORMADOR T3[6](86-T3) ESTA' OPERADO(83) Conf.: 1 (FU=1)

SE :RELE DE BLOQUEIO DO TRANSFORMADOR T3[6](86-T3) ESTA' OPERADO

ENTAO:RELE BUCHHOLZ DO TRANSFORMADOR T3[6](63-T3) ESTA' OPERADO(89) Conf.: 1 (FU=1)

SE :RELE BUCHHOLZ DO TRANSFORMADOR T3[6](63-T3) ESTA' OPERADO

ENTAO:OLEO DO TRANSFORMADOR[6] ESTA' COM PRESENCA DE GASES (117) Conf.: 1 (FU=0)

SE :OLEO DO TRANSFORMADOR[6] ESTA' COM PRESENCA DE GASES

ENTAO:TRANSFORMADOR 3 - 138/23 kV(T3) ESTA' COM CURTO CIRCUITO INTERNO (118) Conf.:1 (FU=0)

Fig. 5.6 - Justificativas



### Auxílio ao Operador:

Durante o diálogo, o Sistema MINOS pode fornecer também, a pedido do Operador através da opção PORQUE, uma justificativa a respeito das informações solicitadas. Por exemplo, retornando parte do diálogo já apresentado, temos:

```

MINOS      : - (39)50/51N OPERADO
            - (39)50/51C OPERADO
            - (39)50/51B OPERADO
            - (39)50/51A OPERADO
            - PORQUE
            - NENHUMA DAS OPÇÕES

OPERADOR   : - PORQUE
  
```

A justificativa dada por MINOS pode ser vista na fig. 5.7 abaixo.

#### Alarme num. 6

SE :DISJUNTOR (39)(52) ABRIU

ENTAO:[?] RELE DE SOBRECORRENTE - NEUTRO(39)(50/51N) ESTA' OPERADO (211) Conf.: 1 (FU=1)  
OU

[?] RELE DE SOBRECORRENTE - FASE C(39)(50/51C) ESTA' OPERADO (210) Conf.: 1 (FU=1)  
OU

[?] RELE DE SOBRECORRENTE - FASE B(39)(50/51B) ESTA' OPERADO (209) Conf.: 1 (FU=1)  
OU

[?] RELE DE SOBRECORRENTE - FASE A(39)(50/51A) ESTA' OPERADO (208) Conf.: 1 (FU=1)  
OU

[n] RELE AUX. DO RELE DE BLOQUEIO DO TRANSFORMADOR T3(6)(86X-T3) ESTA' OPERADO (84) Conf.: 1 (FU=1)  
OU

[s] RELE DE BLOQUEIO DO TRANSFORMADOR T3(6)(86-T3) ESTA' OPERADO (83) Conf.: 1 (FU=1)

Fig. 5.7 - Justificativa PORQUE.

As letras "s" e "n" entre colchetes antes de cada opção indicam, respectivamente, que já existe uma confirmação anterior de que esta opção "É CAUSA" ou "NÃO É CAUSA". O símbolo "?" indica que o sistema ainda não possui informação sobre esta opção.

c. Dados quantitativos relativos ao exemplo.

Para este exemplo de consulta, obteve-se os seguintes dados:

- Tempo de procura e obtenção das conclusões: 12.9 seg.
- Tempo de obtenção das justificativas:
  - Para primeira conclusão: 4.7 s.
  - Para segunda conclusão : 4.6 s.
  - Máxima memória ocupada na solução deste problema: 188 kbytes.

Os tempos de procura apresentados não levam em conta os tempos de aquisição das informações por estarem, nesta etapa, dependentes do Operador. No caso da aquisição numa Base de Dados de um Sistema Digital de Controle, os tempos de aquisição podem ser considerados pequenos frente aos tempos de procura das causas.

### 5.7.2. Exemplo de utilização para Diagnóstico de Defeitos.

a. Problema a tratar:

Determinar quais as causas que levam a chave

seccionadora 89C do Bay 4 à não operar e o disjuntor do Bay 5 à não fechar.

b. Consulta ao Sistema MINOS.

Após a introdução das informações relativas aos problemas apresentados, inicia-se o diálogo com o Operador, associado a processo de procura, o qual é reproduzido a seguir:

MINOS : -(4)CC FALTANDO NO C4  
 -(5)52 FECHADO  
 -(4)43 NA POSIÇÃO N  
 -PORQUE  
 -NENHUMA DAS OPÇÕES

OPERADOR : -NENHUMA DAS OPÇÕES

MINOS : -(5)LR NA POSIÇÃO ERRADA  
 -(5)CC FALTANDO NO C5  
 -(6)43 NA POSIÇÃO T/I  
 e  
 (6)86-T3 OPERADO  
 -(4)43 NA POSIÇÃO T/I  
 e  
 (4)86-T2 OPERADO  
 -PORQUE  
 -NENHUMA DAS OPÇÕES

OPERADOR : -NENHUMA DAS OPÇÕES

Neste ponto, o Sistema Especialista encerra o diálogo com o Operador e após poucos segundos, está em condições de fornecer as conclusões, classificadas segundo o Fator de Certeza de cada uma, conforme pode ser visto na fig.5.8.

- 1 - DEFEITO : [4]89C - NAO OPERA :  
CAUSA : (0.949)CHAVE SELETORA L/R DA CD 138 KV[4](B04) ESTA' NA POSICAO ERRADA (45)
- 2 - DEFEITO : [5]52 - NAO FECHA :  
CAUSA : (0.932)BOBINA DE FECHAMENTO DO DISJUNTOR[5](52C) ESTA' QUEIMADA (69)
- 3 - DEFEITO : [4]89C - NAO OPERA :  
CAUSA : (0.896)SISTEMA MECANICO[4] ESTA' TRAVADO (52)
- 4 - DEFEITO : [5]52 - NAO FECHA :  
CAUSA : (0.866)COMPRESSOR DE AR DO DISJUNTOR[5](ACH) ESTA' COM CURTO CIRCUITO (79)
- 5 - DEFEITO : [5]52 - NAO FECHA :  
CAUSA : (0.865)COMPRESSOR DE AR DO DISJUNTOR[5](ACH) ESTA' COM DEFEITO (78)
- 6 - DEFEITO : [5]52 - NAO FECHA :  
CAUSA : (0.857)FIACAO[5] ESTA' COM DEFEITO NO CIRCUITO DE FECHAMENTO (68)
- 7 - DEFEITO : [4]89C - NAO OPERA :  
CAUSA : (0.857)CONTACTOR DE COMANDO DA CD 138 KV[4](C1/C2) ESTA' COM CURTO CIRCUITO (49)
- 8 - DEFEITO : [4]89C - NAO OPERA :  
CAUSA : (0.824)MOTOR[4] ESTA' COM DEFEITO (51)
- 9 - DEFEITO : [4]89C - NAO OPERA :  
CAUSA : (0.789)FIACAO[4] ESTA' COM CURTO CIRCUITO (50)
- 10 - DEFEITO : [5]52 - NAO FECHA :  
CAUSA : (0.775)CHAVE DE COMANDO[5](52-CS) ESTA' COM DEFEITO (55)
- 11 - DEFEITO : [4]89C - NAO OPERA :  
CAUSA : (0.775)CHAVE DE COMANDO[4](89C-CS) ESTA' COM DEFEITO (48)
- 12 - DEFEITO : [5]52 - NAO FECHA :  
CAUSA : (0.755)SENSOR DE PARTIDA COMPRESSOR[5](63AG) ESTA' COM DEFEITO (74)
- 13 - DEFEITO : [5]52 - NAO FECHA :  
CAUSA : (0.721)CHAVE MAGNETICA DO COMPRESSOR DO DISJUNTOR[5](88ACH) ESTA' COM DEFEITO (75)
- 14 - DEFEITO : [5]52 - NAO FECHA :  
CAUSA : (0.71)TUBULACAO DE SF6[5] ESTA' COM VAZAMENTO (82)
- 15 - DEFEITO : [5]52 - NAO FECHA :  
CAUSA : (0.635)TUBULACAO DE AR COMPRIMIDO[5] ESTA' COM VAZAMENTO (76)
- 16 - DEFEITO : [4]89C - NAO OPERA :  
CAUSA : (0.548)CHAVE DE BLOQUEIO DA CD 138 KV[4](B02) ESTA' OPERADA (46)

Fig. 5.8 - Conclusões

Como no exemplo anterior, é possível obter as justificativas para cada conclusão. Na fig. 5.9 é mostrada a justificativa para a conclusão num. 5.

Conclusao numero :5

Com as informacoes disponiveis e possivel concluir com (0.865) razoavel confianca que o seguinte defeito:

Defeito num. 2 Bay :[5]  
52 - NAO FECHA

tem como causa o seguinte fato:

COMPRESSOR DE AR DO DISJUNTOR[5](ACH) ESTA' COM DEFEITO (78)

Porque :

1.-Foram confirmados os seguintes fatos:

2-Foram utilizadas as seguintes regras :

SE :DISJUNTOR [5](52) NAO OPERA  
ENTAO:RELE AUXILIAR DE PRESSAO DO DISJUNTOR[5](63CLX) ESTA' OPERADO (59) Conf.: 0.6 (FU=0)

SE :RELE AUXILIAR DE PRESSAO DO DISJUNTOR [5](63CLX) ESTA' OPERADO  
ENTAO:RELE DE BAIXA PRESSAO DE AR COMP. DO DISJUNTOR[5](63AL) ESTA' OPERADO (72) Conf.: 0.9 (FU=0)

SE :RELE DE BAIXA PRESSAO DE AR COMP. DO DISJUNTOR [5](63AL) ESTA' OPERADO  
ENTAO:RELE TERMICO DO COMPRESSOR[5](49H) ESTA' OPERADO (73) Conf.: 0.9 (FU=0)

SE :RELE TERMICO DO COMPRESSOR [5](49H) ESTA' OPERADO  
ENTAO:COMPRESSOR DE AR DO DISJUNTOR[5](ACH) ESTA' COM DEFEITO (78) Conf.: 1 (FU=0)

Fig. 5.9 - Justificativas

c. Dados quantitativos relativos ao exemplo 2.

Para este exemplo de consulta, foram obtidos os seguintes dados:

- Tempo de procura e obtenção da conclusões: 14.0 s.
- Tempo de obtenção da justificativa pedida: 3.8 s.
- Máxima memória ocupada na solução deste problema: 168 kbytes.

5.8. Conclusões.

Neste capítulo foram apresentadas as principais características do Protótipo do Sistema Especialista para Auxílio à Operação de Subestações, denominado MINOS.

A Base de Conhecimentos deste protótipo é composta de Fatos e Regras, onde os Fatos descrevem os alarmes, bays, e equipamentos existentes, e as regras descrevem as características funcionais e operacionais da subestação.

O processo de procura objetiva reproduzir as funções de Tratamento de Alarmes e Diagnóstico de Defeitos de forma semelhante aos procedimentos usuais do Operador. Em consequência, a procura das soluções foi dividida em três fases, quais sejam: obtenção de informações com auxílio do Operador, determinação das causas, e obtenção das conclusões. As conclusões são então classificadas segundo seus respectivos Fatores de Certeza e agrupadas caso representem uma causa comum a vários problemas.

Foram implementadas também interfaces de fácil

utilização, tanto para o Operador quanto para o Especialista, a partir das quais torna-se possível a consulta ao Sistema Especialista, a obtenção das respostas e justificativas, e o acesso à Base de Conhecimentos para efetuar inclusões ou retiradas de Fatos e/ou Regras.

A seguir foram apresentados exemplos de utilização que além de mostrarem como é realizado o processo de consulta, comprovaram a validade da proposta de uso de um Sistema Especialista para estas funções, visto que:

- O tempo para obtenção das conclusões é compatível com os tempos gastos por Especialistas, sendo que, na maioria dos casos, foram menores.

- O fornecimento de todas as soluções possíveis para os problemas propostos, classificadas a partir do Fator de Certeza de cada uma;

- A grande maioria dos problemas encontrados em subestações é atendido;

- A adoção da filosofia de preenchimento de campos para entrada de problemas, bem como, de menus para comunicação com Operador durante a fase de procura, faz com que a probabilidade deste cometer erros seja bastante reduzida.

- O grau de detalhamento de uma conclusão é função apenas do conhecimento que o sistema dispõe sobre a subestação, e este pode ser facilmente aumentado através da Interface com Especialista.

Entretanto, constatou-se também que o número de problemas (alarmes ou defeitos) simultâneos que o protótipo pode resolver depende da capacidade de memória disponível e do número de conclusões obtidas.



## CAPÍTULO 6

### CONCLUSÕES:

O protótipo apresentado neste trabalho corresponde a primeira etapa do desenvolvimento de um Sistema Especialista para auxiliar operadores de subestações de alta tensão na execução das tarefas de natureza investigatória ou decisória. Nesta etapa, as informações complementares necessárias para o Sistema Especialista poder executar o seu processo de procura das soluções, são fornecidos pelo próprio operador. Nas etapas seguintes, estas informações poderão ser acéssadas diretamente na Base de Dados do Sistema Digital de Controle instalado na subestação. Por fim, em sua última etapa de desenvolvimento, o Sistema Especialista poderá fornecer também os sinais de controle.

O protótipo foi elaborado a partir de um estudo geral sobre as funções de controle em subestações, destacando as funções de Diagnóstico de Defeitos e Tratamento de Alarmes, e sobre as técnicas de Inteligência Artificial, em particular, as que dizem respeito aos Sistemas Especialistas. Deste estudo, resultou a definição das características do Sistema Especialista e das suas várias etapas de desenvolvimento.

No que diz respeito a representação do conhecimento, foram adotados para registrar as características de funcionamento normal e anormal da subestação, fatos e regras, associando a estas últimas, um Fator de Confiança para sua aplicação.

A procura segue a direção para-frente, que foi escolhida por

permitir uma rápida obtenção de todas as soluções possíveis para o problema. Nesta etapa, o processo de procura é, basicamente, dividido em duas fases : uma primeira na qual o operador fornece, a pedido, informações complementares ao Sistema Especialista e uma segunda onde a procura é feita ininterruptamente sobre regras para as quais o operador não possui condições de fornecer informações. No final da procura, as soluções são apresentadas segundo uma classificação, vinculada aos fatores de certeza, calculados durante o processo. A pedido do operador, podem também ser apresentadas as justificativas relativas a estas soluções.

As Interfaces com o Operador e com o Especialista oferecem um conjunto de facilidades (menu, janelas, verificação automática de consistência, existência e sintaxe) que tornam bastante simples o uso do protótipo. Estas interfaces permitem respectivamente ao Operador consultar o Sistema Especialista e responder aos pedidos de informação deste, e ao Especialista consultar, modificar e criar uma Base de Conhecimentos para cada subestação.

A análise do desempenho do protótipo proposto permitiu mostrar a importância do uso de um Sistema Especialista no diagnóstico e na tomada de decisão em subestações, validar as técnicas de representação de conhecimentos e de procura adotadas nesta primeira versão, detetar seus limites e propor melhorias para um novo protótipo.

Os testes efetuados mostraram que o protótipo permite o tratamento de um número de alarmes compatível com as ocorrências

em subestações, bem como a possibilidade de diagnosticar a maior parte de seus defeitos. Eles comprovaram também as melhorias trazidas em termos de rapidez na execução de uma tarefa, na diminuição do grau de incerteza e no aumento da uniformização nas tomadas de decisões.

Por outro lado, as técnicas escolhidas para representar o conhecimento, permitiram um registro grande de fatos e regras. Entretanto, uma melhor flexibilidade de representação poderá ser obtida na próxima versão, adotando uma estrutura conjuntiva para o lado esquerdo das regras e uma estrutura parametrizada para as regras em geral.

O processo de procura adotado, permite obter todas as soluções possíveis, mas em contrapartida, por ser um processo exaustivo, pode apresentar problemas de velocidade, que poderão ser minimizados pelo aperfeiçoamento da representação das regras, conforme proposto acima, e pela otimização do algoritmo de procura implementado.

Os testes da primeira versão do Sistema Especialista permitiram detetar as limitações do projeto efetuado e aprender sobre o seu uso, permitindo assim apontar para uma versão melhorada que conterà além das propostas em termos de representação do conhecimento e do processo de procura, a possibilidade de aquisição automática de dados e a execução da função de Atendimento de Contingências.

Outrossim, este protótipo apresenta características de simplicidade de uso e de justificativas das soluções, que o credencia para ser usado na formação tanto de projetistas como

de operadores de subestações.

Os conhecimentos e as técnicas adquiridas no projeto desta versão abrem também possibilidades para o seu uso em outros tipos de instalações, tais como usinas, centro de operações e processos industriais.

## BIBLIOGRAFIA

(BARR,81)

BARR,A./FEIGENBAUN,E.A.

The Handbook of Artificial Intelligence

William Kaufmann, Inc 1981

(BORNARD,86)

BORNARD,P/MERLIN,A/BOURDE,M/ARBES,J/EBERSOHL,G

Architecture of the Digital Control and Protection Systems  
for EHV substations.

CIGRE Group 34 1986

(BOURDÉ,84)

BOURDÉ,Michel

Local Networks in High Voltage Substations.

RGE-6/84

(CARDOZO)

CARDOZO,E./TALUKDAR,S. N.

A Distributed Control Strategy for Energy Management  
Centers.2nd International Conference on POWER SYSTEM MONITORING AND  
CONTROL.

(CASANOVA,86)

CASANOVA,Marco A./GIORNO,Fernando A. C./FURTADO,Antonio L.

Programação em Logica.

V Escola de Computação Belo Horizonte UFMG 1986

(CEPEL,84)

CEPEL

Rede Distribuída de Medição e Controle

(CIGRE, 83)

CIGRE SC 34, Working Group 34.02.

Interin Report on Computer Based Protection and Digital  
Techniques in Substations.

(CIGRE, 86)

Special Report for Group 34(34-00)

Protection

(DUFRESNE, 84)

DUFRESNE, Pierre/GHALLAB, Malik

Moteurs d'Inference pour Systemes de Production:

Techniques de Compilation et d'Interpretation.

Laboratoire d'Automatique et d'Analyse des Systemes du CNRS.

(EISENBACH, 85)

EISENBACH, Susan/SADLER, Chris

Declaratives Languages: an Overview.

BYTE August 1985

(KOMAI, 86)

KOMAI, K./SAKAGUCHI, T

Artificial Intelligence Method for Power System Fault  
Diagnosis.

2nd International Conference on POWER SYSTEM MONITORING AND  
CONTROL.

(LACERDA, 86)

LACERDA, Paulo N./FARINES, Jean-Marie

Um Sistema Perito para Apoio a Operação de Subestações de  
Alta Tensão.

3 Simpósio Brasileiro de Inteligência Artificial.

(RICH,83)

RICH, Elaine  
 Artificial Intelligence  
 McGraw-Hill

(SANTOS,84)

SANTOS, Carlos M.F.  
 Instrumentação Distribuída para Subestações de Energia  
 Elétrica.  
 COOPPE/UFRJ-Tese de Mestrado

(SHORTLIFFE,76)

SHORTLIFFE, Edward H.  
 Computer-Based Medical Consultation:MYCIN.  
 American Elsevier P. Co. Inc.

(WATERMAN,86)

WATERMAN, Donald A.  
 A Guide to Expert Systems.  
 Addison-Wesley Publishing Company.

(WEISS,84)

WEISS, Sholon/KULIKOWSKII, Casimir A.  
 A Pratical Guide to Designing Expert Systems.  
 Rowman e Allanheld.

(WINSTON,84)

WINSTON, Patrick H.  
 Artificial Intelligence  
 Addison-Wesley P. C. 1984

(WOODS,83)

WOODS, William A.  
 What's Importantt About Knowledge Representation?  
 Computer, Outubro 1983